

Flexible ITO/PEDOT:PSS Hybrid Transparent Conductive Electrodes for Polymer-Dispersed Liquid Crystal Smart Window Applications

Eun Mi Kim* 

National Center for Nano process and Equipments, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

고분자 분산 액정 스마트 윈도우용 유연 ITO/PEDOT:PSS 하이브리드 투명전극 특성 연구

김은미* 

한국생산기술연구원 나노기술집적센터

✉ Corresponding author(s): kimeunmi@kitech.re.kr (E. M. Kim)

Cite as J. Electr. Electron. Mater., 39(5), 540–548 (2026), DOI: <https://doi.org/10.4313/JEEM.2026.39.5.11>

Received July 30, 2026; Revised August 24, 2026; Accepted August 25, 2026

ABSTRACT: Smart windows capable of dynamically controlling light transmission are gaining increasing attention as a means of reducing building energy consumption while improving indoor comfort. However, indium tin oxide (ITO), the most widely used transparent electrode in such devices, suffers from poor mechanical flexibility due to its intrinsic brittleness, limiting its use in curved or flexible window applications. Here, we demonstrate a flexible ITO/DPP hybrid transparent electrode, fabricated by depositing a dimethyl sulfoxide (DMSO)-doped PEDOT:PSS (DPP) layer on ITO, that achieves markedly improved bending durability while maintaining electro-optical performance comparable to bare ITO. The hybrid electrode with an optimized DPP thickness of 120 nm exhibited a sheet resistance of 23.3 $\Omega/\text{sq.}$, about 20% lower than that of ITO (29 $\Omega/\text{sq.}$), while maintaining comparable visible-range transmittance. A polymer-dispersed liquid crystal (PDLC) device fabricated with this electrode showed only a slight decline in driving voltage and transmittance relative to ITO. Notably, its resistance change under repeated bending at a curvature radius of 30 mm was only 25.1%, less than half that of ITO (51.6%). These results suggest that the ITO/DPP hybrid electrode is a promising candidate for transparent electrodes in curved and flexible smart windows and other flexible optoelectronic devices.

KEYWORDS: Transparent conductive electrode, ITO, PEDOT:PSS, Polymer-dispersed liquid crystal, Flexible electrode

1 서론

현대 도시화와 건축 기술의 발전에 따라 건축물 내 에너지 소비가 급증하면서, 에너지 자원 고갈 및 비용 상승 문제가 심화되고 있다 [1-3]. 이에 따라 실내 쾌적성을 유지하면서 에너지 효율을 극대화할 수 있는 기술에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있으며, 태양열 및 가시광선 투과율을 동적으로 조절하여 에너지 소비 절감과 실내 환경 개선을 동시에 달성할 수 있는 스마트 윈도우(Smart Window)가 핵심 기술로 주목받고 있다 [4-6]. 스마트 윈도우는 구동 방식에 따라 온도, 광량 등 환경 변화에 자발적으로 반응하는 수동형(passive)과 외부 전압 인가를 통해 투과율을 제어하는 능동형(active)으로 구분된다 [7]. 수동형에는 열변색(thermochromic), 광변색(photochromic) 방식이 있으며, 능동형에는 전기 변색(electrochromic), 고분자 분산 액정(polymer dispersed liquid crystal, PDLC) 방식 등이 있다. 이 중 고분자 분산 액정(PDLC) 기반 스마트 윈도우는 인가 전압에 따라 액정의 배향이 변화하여 투과율이 즉각적으로 조절되는 신속한 응답 특성을 지니며, 대면적 대량 생산이 용이하고 기존 창호에 적용이 용이하여 활발히 연구되고 있다 [8].

최근에는 곡면 건축 파사드 등 여러 형태의 창호로 응용 범위가 확대됨에 따라, PDLC 소자를 구성하는 투명 전도성 전극(transparent conductive electrodes, TCEs) 역시 우수한 전기적, 광학적 특성과 함께 기계적 유연성을 확보하는 것이 요구되고 있다. 대표적인 투명 전도성 전극 재료인 인듐 주석 산화물(indium tin oxide, ITO)은 뛰어난 전기 전도성과 광학적 투명성을 바탕으로 디스플레이, 터치패널, 태양전지 등 다양한 광전자 소자에 폭넓게 활용되어 왔으나, 무기 산화물 특유의 취성(brittle nature)으로 인해 기계적 유연성이 부족하며 반복적인 기판 변형 시 미세 균열(crack)이 발생하기 쉽다는 한계를 지닌다 [9-11]. 이러한 한계를 극복하기 위한 연구는 크게 두 방향으로 진행되어 왔다. 하나는 ITO 자체의 물성을 개선하는 나노스케일 구조 조절 [12,13], 비정질화 공정 [14,15], 저온 용액 공정 [16,17] 등의 접근이며, 다른 하나는 ITO의 우수한 광·전기적 특성을 유지하면서 기계적 안정성을 보완하는 하이브리드 전극 구조를 도입하는 것이다. 이 중 하이브리드 전극 구조는 다양한 소재와의 결합이 가능하며, 고분자 복합체 [18,19], 나노 와이어 복합체 [20,21], 그래핀 복합체 [22-24], 탄소나노튜브 복합체 [25] 등 다양하게 보고되어 왔다. 이러한 하이브리드 소재들은 대체로 우수한 유연성을 제공하지만, 나노 와이어나 탄소 기반 소재의 경우 균일한 대면적 코팅 공정 구현과 접촉 저항 제어에 어려움이 따르는 것으로 알려져 있어 [26], 상대적으로 공정성이

우수한 대안 소재에 대한 연구가 병행되고 있다. 이 중에서도 전도성 고분자 기반 하이브리드 전극은 용액 공정을 통한 대면적 코팅이 가능하고 기계적 유연성과 전기 전도성을 효과적으로 향상시킬 수 있는 유력한 대안으로 평가받고 있으며, 대표적인 전도성 고분자인 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)는 우수한 성막성과 화학적 안정성을 바탕으로 폭넓게 활용되고 있다.

본 연구에서는 ITO의 기계적 취약성을 극복하고 전극의 유연성과 전기적 안정성을 동시에 확보하기 위해, ITO 상부에 PEDOT:PSS 층을 결합한 ITO/PEDOT:PSS 하이브리드 전극을 제안하였다. PEDOT:PSS의 전도도 향상 조건 및 최적 두께 조건을 도출하고, 완성된 하이브리드 전극의 전기적, 광학적 특성을 ITO 단일층 전극과 비교 분석하였다. 아울러 하이브리드 전극을 유연 PDLC 스마트 윈도우 소자에 적용하여 전압 인가에 따른 구동 특성을 평가하고, 반복적인 기계적 굽힘에 대한 내성(bending durability)을 정량적으로 검증함으로써 유연 전자 소자용 투명 전극으로서의 적용 가능성을 확인하였다.

2 실험방법

2.1 하이브리드 박막 제조

본 연구에서는 소자 제작용 PEN(polyethylene naphthalate) 기판과 구조 분석용 Non-Alkali Glass 기판 위에 ITO 단일층 전극 및 ITO/PEDOT:PSS 하이브리드 전극을 제작하였다.

ITO 단일층 전극은 RF 마그네트론 스퍼터링을 이용해 In₂O₃:SnO₂ (90:10 wt%) 타겟으로부터 RF 파워 300 W, 공정 압력 2.5 mTorr, Ar 유량 90 sccm, 150°C 조건에서 150 nm 두께로 증착하였다. ITO/PEDOT:PSS 하이브리드 전극은 동일한 조건으로 증착된 ITO 단일층 전극 상부에 PEDOT:PSS 용액을 스핀 코팅하여 제작하였다. PEDOT:PSS 용액(Clevios PH1000, Heraeus)에는 전도도 및 코팅 균일성 향상을 위해 디메틸 설펍사이드(dimethyl sulfoxide, DMSO, Sigma-Aldrich)와 불소계 계면활성제(Zonyl FS-300, Alfa Aesar)를 첨가하였으며, 0.45 µm PVDF 필터로 여과한 뒤 사용하였다. 준비된 용액은 스핀코팅 속도를 500-2000 rpm 범위에서 조절하여 120°C의 hot plate 위에 20분간 열처리하여 80-140 nm 두께의 PEDOT:PSS 박막을 형성하였다.

2.2 PDLC 소자 제작

제작된 투명 전극의 소자 적용성을 검증하기 위해 ITO 단일

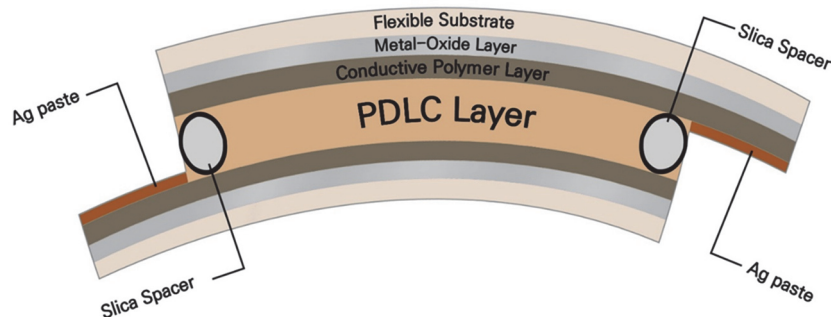


Fig. 1. Schematic illustration of the flexible PDLC device structure, consisting of a flexible substrate, a metal-oxide (ITO) layer, a conductive polymer (DPP) layer, and a PDLC layer, with silica spacers and Ag paste electrodes

층 전극과 ITO/PEDOT:PSS 하이브리드 전극을 각각 적용하여 PDLC 소자를 제작하였다. PDLC 혼합물은 지방족 우레탄 트리아크릴레이트 올리고머, 2-에틸헥실 아크릴레이트(2-ethylhexyl acrylate, 2-EHA), 2-에틸헥실 메타크릴레이트(2-ethylhexyl methacrylate, 2-EHMA) 기반 예비중합체 40 wt%와 시아노비페닐계 공용 액정 60 wt%를 혼합하여 제조하였으며, 균일한 셀 갭 유지를 위해 20 μm 크기의 실리카 미립자를 스페이서로 첨가하였다. 제작된 PDLC 혼합물을 하부 전극 위에 도포한 뒤, 상부 전극을 적층하여 그림 1과 같이 샌드위치 구조를 형성하였다. 이 구조체에 365 nm 파장, 1 mW/cm^2 강도의 자외선(UV)을 [ENF-240, Spectronics]을 이용하여 60 초간 조사하여 경화시킴으로써, 고분자 매트릭스 내에 액정 액적이 균일하게 분산된 PDLC 층을 완성하였다.

2.3 특성평가

제작된 박막의 표면 형태는 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM, FEI Quanta 200 FEG)으로 관찰하였고, 화학적 조성 및 결합 상태는 X선 광전자 분광법(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS, Thermo Fisher Scientific Co., NEXSA)을 활용하여 분석하였다. 전기적 특성인 면저항은 4-Point probe 시스템(NAPSON, RT-3000/RG-100)으로 측정하였고, 광학적 투과율은 자외선-가시광선 분광기(UV-Vis Spectrometer, Lambda 750, Perkin Elmer)를 사용하여 측정하였다. PDLC 소자의 구동 특성은 AC 전압을 0–80 V까지 인가하면서, 자외선-가시광선 분광기(UV-Vis Spectrometer, Lambda 750, Perkin Elmer)로 파장 550 nm 기준 투과율 변화를 측정하였다. 전극의 기계적 유연성은 벤딩 테스트(JUNIL Tech., JIBT610)를 이용하여 곡률 반경 30 mm 조건에서 최대 10,000회까지 반복 굽힘을 가하며 저항 변화율($\Delta R/R_0$)을 측정하였다.

3 결과 및 고찰

제작된 ITO/PEDOT:PSS 하이브리드 전극의 성능을 최적화하기 위해서는, 먼저 PEDOT:PSS 자체의 낮은 전도도 문제를 해결하는 것이 선행되어야 한다. PEDOT:PSS는 우수한 전도성 고분자임에도 불구하고, 절연 성분인 PSS의 높은 비율로 인해 전도 경로가 저해되어 실제 전자 소자에 적용하기에는 저항이 높다는 한계를 지닌다 [27]. 이를 극복하기 위해 산 처리(acid treatment), 첨가제 도핑, 나노구조 형성 등 다양한 화학적 방법이 보고되어 왔으며, 본 연구에서는 이중 공정이 간단하면서도 효과가 우수한 디메틸 설펝사이드(DMSO) 도핑을 통해 PEDOT:PSS의 전도도 향상을 확보하고자 하였다 [28–32].

그림 2(a)는 DMSO 함량 변화에 따른 PEDOT:PSS의 면저항 변화를 나타낸다. DMSO 함량이 증가함에 따라 면저항은 감소하였으나, 5 wt%를 초과한 구간에서는 오히려 증가하는 경향을 보였다. 이는 DMSO가 일정 함량까지는 PEDOT:PSS의 전도도 향상에 기여하지만, 과도하게 첨가될 경우 오히려 전도 경로 형성을 저해할 수 있음을 시사한다. 그림 2(b)는 1 wt% 및 5 wt% DMSO 도핑 조건에서의 주사전자현미경(FE-SEM) 표면 이미지를 비교한 것으로, DMSO 도핑에 따라 PEDOT:PSS의 표면 형태가 변화함을 확인하였다. 이러한 표면 형태 변화는 DMSO가 PEDOT을 감싸고 있는 절연성 PSS 셀을 부분적으로 제거함에 따라 PEDOT과 PSS 간 상분리(phase separation)가 유도되고, 이 과정에서 PEDOT 사슬의 재배열 및 응집이 촉진되기 때문으로 판단된다 [33]. 이러한 결과를 종합하면, 전도도 향상과 박막의 구조적 안정성을 동시에 만족하는 조건으로 5 wt% DMSO 도핑이 가장 적합한 것으로 사료된다.

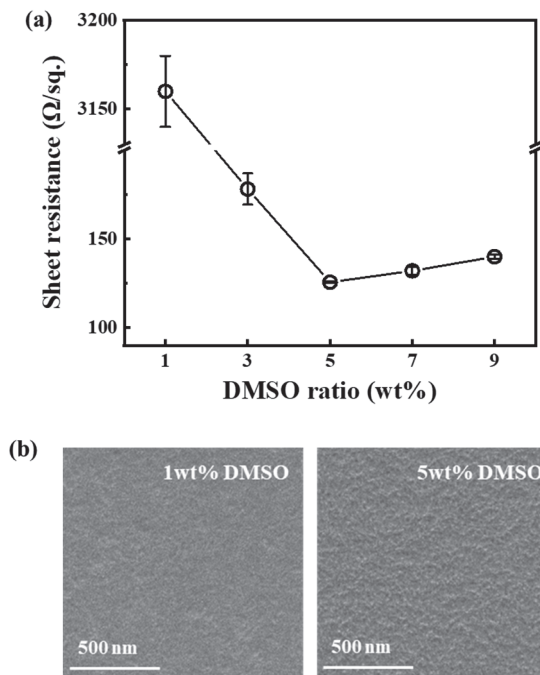


Fig. 2. (a) Sheet resistance of PEDOT:PSS films as a function of DMSO doping ratio (wt%) and (b) FE-SEM surface images of PEDOT:PSS films doped with 1 wt% and 5 wt% DMSO

그림 2에서 관찰된 표면 형태 변화의 원인을 조성 측면에서 규명하기 위해, X선 광전자 분광법(XPS)을 이용하여 도핑 전 후 PEDOT:PSS 박막의 표면 화학 조성을 분석하였다. 그림 3(a)와 3(b)는 각각 순수 PEDOT:PSS 및 5 wt% DMSO가 도핑된 PEDOT:PSS 박막의 S2p XPS 스펙트럼을 나타낸다. PEDOT의 특성 피크는 164–166 eV, PSS의 특성 피크는 168–170 eV의 결합 에너지 영역에서 나타나며, 두 피크의 면적비 (PSS/PEDOT ratio)는 박막 표면의 상대적 조성을 나타내는 지표로 활용된다. DMSO 도핑 후 PEDOT 피크의 강도는 증가한 반면 PSS 피크의 강도는 감소하였다. 이는 DMSO 도핑에 따라 박막 표면에서 PSS 함량이 감소하고 PEDOT의 상대적 비율이 증가하였음을 의미하며, 그림 2에서 관찰된 상분리 현상, 즉 DMSO가 PEDOT을 감싸는 절연성 PSS 셸을 부분적으로 제거하여 전도성 PEDOT이 표면에 상대적으로 노출되는 과정과 일치하는 결과이다. 전도도가 낮은 PSS의 표면 함량이 감소하고 전도성 PEDOT의 비율이 증가함에 따라 전자 이동 경로가 개선되며, 이는 그림 2(a)에서 확인된 면저항 감소 결과와도 부합한다 [34].

이상의 면저항 및 XPS 분석 결과를 종합하여, 5 wt% DMSO 도핑 조건을 최적 조건으로 선정하였다. 이하 본 논문에서는

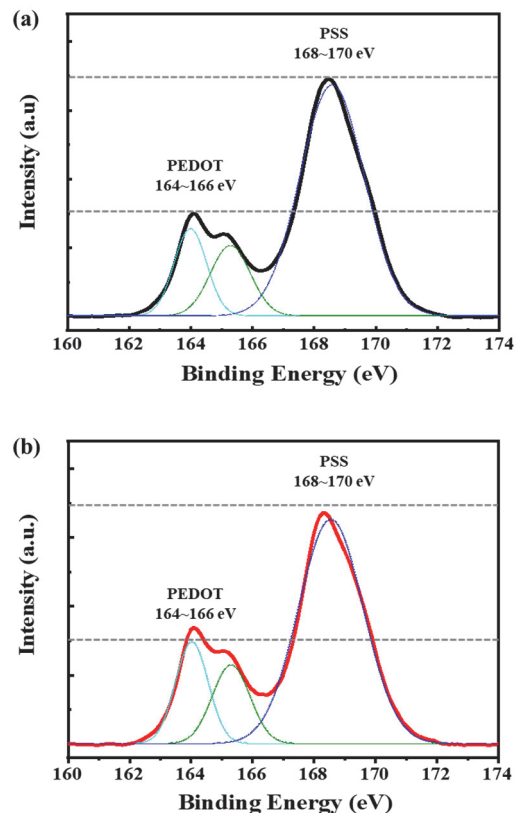


Fig. 3. S2p XPS spectra of (a) pristine PEDOT:PSS and (b) DMSO-doped PEDOT:PSS films

5 wt% DMSO가 도핑된 PEDOT:PSS 층을 DPP(5 wt% DMSO-doped PEDOT:PSS)로 지칭하며, 이후 제작되는 모든 시료에 이 조건을 적용하였다. 아울러 DPP를 이용해 제작된 ITO/PEDOT:PSS 하이브리드 전극은 ITO/DPP 하이브리드 전극으로 표기한다.

DPP를 하이브리드 전극에 적용하기 위한 최적 두께를 도출하고자, 스핀 코팅 속도 조절을 통해 80–140 nm 범위의 두께로 제어하여 박막을 형성하였고, 투명 전극의 핵심 성능 지표인 가시광선 투과율과 면저항을 두께 조건별로 비교하였다. 그림 4(a)는 UV-Vis 분광기로 측정된 투과율 스펙트럼을 나타낸다. 박막이 두꺼워질수록 광 흡수량이 증가하여 투과율은 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며, 80 nm에서는 높은 투과율을 유지하였으나 120 nm에서 소폭 감소하였고 140 nm에서는 뚜렷한 저하가 관찰되었다.

반면 면저항은 상반된 경향을 나타냈다. 그림 4(b)에 나타난 바와 같이, 80 nm에서 213 Ω/sq.였던 면저항은 박막이 두꺼워짐에 따라 점차 감소하여 140 nm에서는 98 Ω/sq.까지 낮아졌

다. 이는 박막 두께가 증가함에 따라 전류가 흐를 수 있는 단면적이 넓어지고 전도 경로가 증가하여 전기 저항이 감소하기 때문으로 해석된다. 이처럼 투과율과 면저항이 서로 상충 관계를 보임에 따라, 두 특성을 함께 고려하는 성능 지수 (figure of merit, FOM)를 다음 식으로 계산하여 그림 4(b)에 나타내었다 [35].

$$\Phi_{TC} = T^{10}/R_{sh}$$

여기서 T 는 550 nm에서의 투과율, R_{sh} 는 면저항이다. 그림 4(b)에서 확인되는 바와 같이, DPP 두께가 증가함에 따라 성능지수(FOM)는 80 nm에서 120 nm까지 $3.224 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 부터 $4.8 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 로 증가하다가, 140 nm에서 $4.6 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 로 다소 감소하는 경향을 보인다. 이는 FOM 산출식에서 투과율 항이 10제곱(T^{10})으로 반영되어 면저항 항보다 변화에 훨씬 민감하게 작용하기 때문이다. 즉, 120 nm 까지는 면저항 감소

효과가 우세하여 FOM이 상승하지만, 140 nm에서는 투과율 저하 효과가 면저항의 감소 효과를 상쇄하여 FOM이 감소한 것으로 판단된다. DPP 120 nm 조건에서는 550 nm 투과율 94.3%, 면저항 $116.1 \Omega/\text{sq.}$ 로 가장 높은 FOM 값($4.8 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$)을 나타내어 전기적·광학적 특성이 가장 균형을 이루는 최적 두께로 확인되었다. 이에 따라 이후 실험에서는 DPP 층의 두께를 120 nm로 고정하였으며, 이하 본 연구에서는 120 nm 두께의 DPP 층을 DPP-120으로 표기한다.

최적화된 DPP-120의 실제 하이브리드 전극 성능을 확인하기 위해 DPP-120을 ITO 상부에 형성하여 ITO/DPP-120 하이브리드 전극을 제작하고, ITO 단일층 전극과 특성을 비교하였다. 그림 5(a)는 두 전극의 면저항을, 그림 5(b)는 투과율을 나타낸다. ITO 단일층 전극의 면저항은 $29 \Omega/\text{sq.}$ 였으며, ITO/DPP-120 하이브리드 전극은 $23.3 \Omega/\text{sq.}$ 로 약 20% 개선되었다. 이는 ITO 상부에 DPP 층이 추가로 적층되어 두 층이 전기적으로 병렬 연결된 전도 경로로 작용함에 따라 전

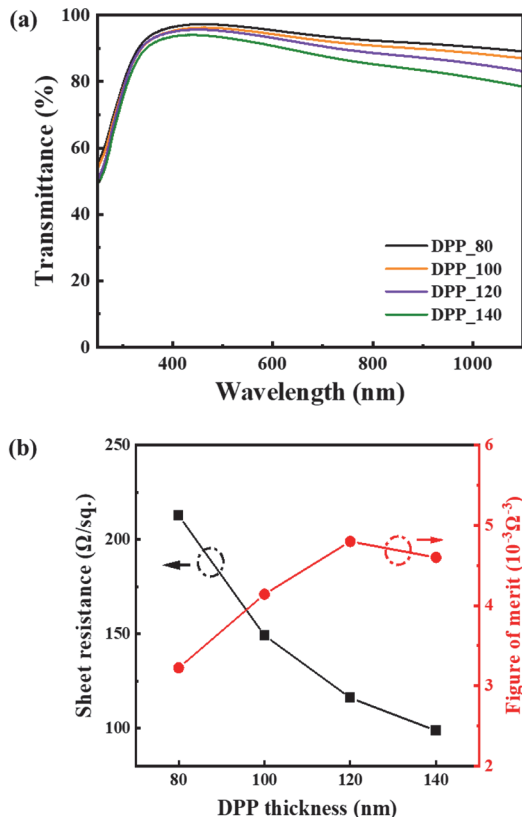


Fig. 4. (a) UV-Vis transmittance spectra of DPP films with thicknesses of 80, 100, 120, and 140 nm and (b) sheet resistance and figure of merit (FOM) of DPP films as a function of thickness

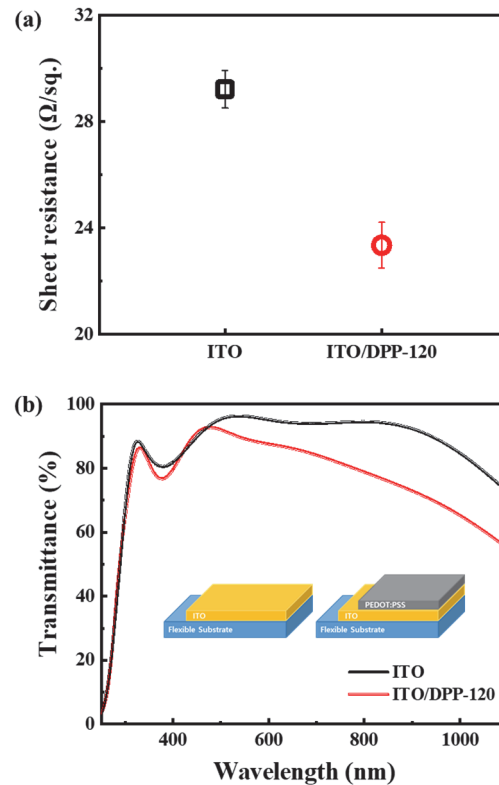


Fig. 5. (a) Sheet resistance and (b) transmittance spectra of the ITO single-layer electrode and the ITO/DPP-120 hybrid electrode. Insets in (b) show schematic cross-sections of the two electrode structures

체 면저항이 ITO 단일층보다 낮아졌기 때문으로 해석된다. 투과율은 가시광선 영역(550 nm 기준)에서 두 전극이 유사한 수준을 나타냈다. DPP 층이 추가되어 전체 두께가 더 두꺼워졌음에도 불구하고, 하이브리드 전극은 550 nm 기준 90% 이상의 높은 투과율을 유지하였다. 다만 장파장(800–1100 nm) 영역에서는 ITO 단일층 대비 투과율이 다소 낮아지는 경향을 보였다. 이는 DPP 층 내 캐리어 밀도가 증가하면서 근적외선 영역의 자유 캐리어 흡수(free carrier absorption)가 강화되었기 때문으로 생각된다. 즉, DPP의 전기 전도도를 향상시키는 요인이 동시에 근적외선 투과율 저하로도 나타난 것이다 [36,37]. 오히려 이러한 현상은 태양광의 근적외선 성분을 일부 차단하는 열 차폐(heat-shielding) 효과로 이어질 수 있으며, 이는 가시광 투과율을 유지하면서도 실내 냉방 부하를 줄이려는 스마트 윈도우의 설계 목적과도 부합하는 특성으로 볼 수 있다. 이상의 결과는 ITO/DPP-120 하이브리드 전극이 가시광선 영역에서 ITO 단일층에 준하는 광학적 투명성을 유지하면서도 면저항 특성이 개선되었으며, 열 차폐 특성까지 더해지면서 스마트 윈도우 응용 관점에서 추가적인 이점으로 작용할 수 있음을 보여준다.

이러한 전기적·광학적 특성이 실제 PDLC 소자 구동에도 유효한지 확인하기 위해, ITO 및 ITO/DPP-120 하이브리드 전극을 각각 적용하여 PDLC 소자를 제작하고 구동 특성을 평가하였다. PDLC 소자는 인가 전압에 따라 투과율이 변화하는 특성을 지니므로, 이러한 전기 광학적 응답은 전극 성능을 평가하는 유효한 지표가 된다. 그림 6(a)는 전압 인가 여부에 따른 PDLC 소자의 이미지를, 그림 6(b)는 인가 전압을 80 V까지 증가시키며 측정한 투과율 변화 그래프를 나타낸다. 이때 최대 투과율의 90%에 도달하는 전압을 포화 전압(saturation voltage)으로 정의하였으며, 이는 소자 구동 성능을 나타내는 핵심 지표로 활용된다. 측정 결과, ITO 전극을 적용한 PDLC 소자는 24 V의 포화 전압과 76.3%의 최대 투과율을 나타낸 반면, ITO/DPP-120 하이브리드 전극을 적용한 소자는 26 V의 포화 전압과 70.1%의 최대 투과율을 나타냈다. ITO/DPP-120 하이브리드 전극을 적용한 소자는 ITO 단일층 전극 대비 포화 전압은 다소 높고, 최대 투과율은 다소 낮게 나타났으나, 그 차이는 약 8% 내외로 크지 않은 수준이었다. 이는 PDLC 소자가 교류(AC) 전압으로 구동되는 커패시터형 소자라는 점에서 이해할 수 있다. DPP 층은 직류(DC) 면저항 측면에서는 전극의 전기 전도 경로를 개선하지만, PEDOT:PSS 특유의 정전용량 성분으로 인해 DPP/PDLC 계면에 추가적인 교류 임피던스를 형성할 수 있다. 이로 인해 PDLC 층에 걸리는 실질적인 유효 전압이 근소하게 감소하여 포화 전압 상승과 최대 투과율 저하로 이어진 것으로 추정된다 [38].

이처럼 ITO/DPP-120 하이브리드 전극은 전기·광학적 구동 특성에서 ITO 단일층 전극 대비 근소한 열세를 보였다. 그러나 유연 소자로의 실제 적용 가능성을 판단하기 위해서는 구동 특성뿐만 아니라 기계적 변형에 대한 안정성, 즉 전극의 유연성이 함께 평가되어야 한다. 전극의 유연성은 벤딩 테스트를 이용하여 곡률 반경 30 mm 조건에서 반복 굽힘에 따른 저항 변화율($\Delta R/R_0$)로 평가하였으며, 측정 장치의 개략도는 그림 7(a)에 나타내었다. 그림 7(b)는 10,000회의 굽힘 사이클 동안 측정한 저항 변화율을 나타낸다. ITO 전극의 저항 변화율은 51.6%로 매우 크게 나타난 반면, ITO/DPP-120 하이브리드 전극은 25.1%로 절반 이하의 변화율을 보였다. 이는 무기 산화물 특유의 취성을 지닌 ITO가 반복적인 기계적 변형에 취약하여 균열이 발생하기 쉬운 반면, 연성이 우수한 DPP 층이 ITO 상부에서 응력을 일부 완충함으로써 전극 전체의 기계적 안정성이 향상되었기 때문이다 [39]. 이전에 보고된 하이브리드 투명전극 연구들과 비교하면, 본 연구의 ITO/DPP-

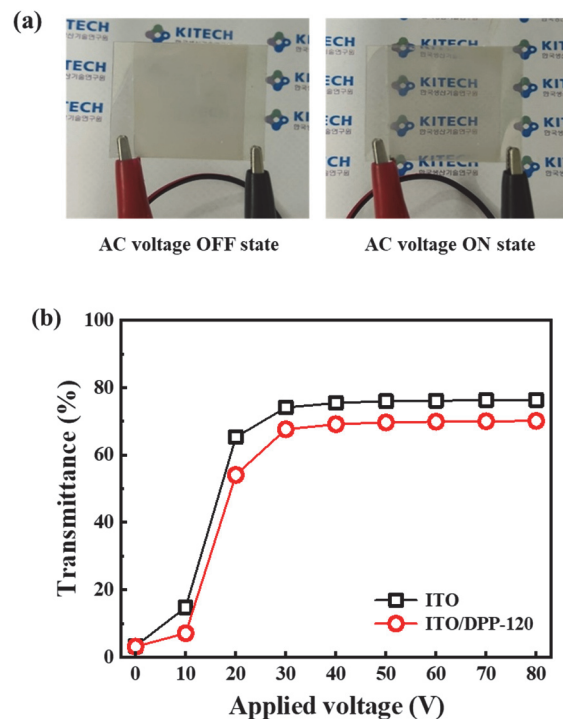


Fig. 6. (a) Photographs of the PDLC device in the AC voltage-off and voltage-on states, and (b) transmittance as a function of applied voltage for PDLC devices fabricated with the ITO single-layer electrode and the ITO/DPP-120 hybrid electrode (indicating a favorable ON-state transparency range of 70–80% for commercial applications)

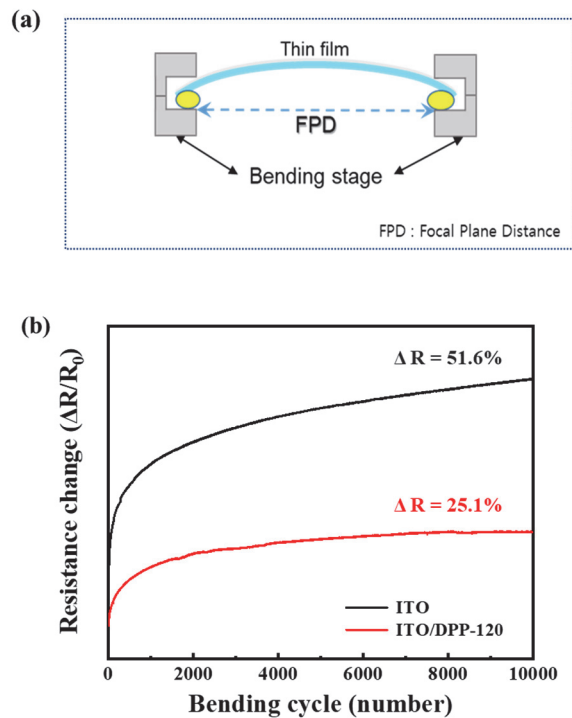


Fig. 7. (a) Schematic diagram of the bending test setup used to evaluate electrode flexibility (FPD: focal plane distance) and (b) resistance change ($\Delta R/R_0$) of the ITO single-layer electrode and the ITO/DPP-120 hybrid electrode as a function of bending cycle number, measured at a curvature radius of 30 mm

120 전극(면저항 $23.3 \Omega/\text{sq.}$, 투과율 94.3%)은 PEDOT:PSS/ITO 하이브리드 전극 [40], 다층 적층형 ITO/PEDOT:PSS 초격자 전극 [41], AgNW-PEDOT:PSS-ITO 삼원계 하이브리드 전극 [42,43] 등 선행연구 대비 더 낮은 면저항을 나타내면서도 이에 준하는 수준의 가시광선 투과율을 확보하였다. 특히 굽힘 내구성 측면에서 대부분의 선행연구는 순수 ITO 대비 우수한 유연성(better flexibility) [40,41] 또는 뛰어난 내구성(excellent durability) [42]과 같은 정성적 서술에 그쳤을 뿐, 특정 굽힘 반경 및 반복 횟수 조건에서의 정량적 저항 변화율($\Delta R/R_0$) 데이터는 제시하지 않았다. 일부 연구에서 반복 굽힘 조건에서의 정량적 결과를 보고하였으나, 이는 저항 변화율($\Delta R/R_0$)이 아닌 인장 변형률(strain) 기준으로 제시되어 있어 [43] 본 연구와의 직접적인 비교에는 한계가 있다. 이러한 관점에서 본 연구는 곡률 반경 30 mm, 10,000회 반복 조건에서 변형률($\Delta R/R_0$) 25.1%라는 명확한 정량적 결과를 제시함으로써, 연구 간 기계적 내구성을 보다 직접적이고 재현 가능하게 비교할 수 있는 근거를 마련하였다. 위 결과를 중

합해 볼 때, ITO/DPP-120 하이브리드 전극은 구동 전압과 최대 투과율 면에서 ITO 단일층 전극 대비 근소한 열세를 보였다. 특히 주목할 점은, 이러한 전기·광학적 성능의 근소한 저하에도 불구하고 반복 굽힘에 대한 저항 변화율이 절반 이하로 크게 개선되었다는 것이다. 즉, 전기·광학적 성능의 근소한 저하를 상쇄하고도 남을 만큼 기계적 유연성이 확보되었다는 점에서, ITO/DPP-120 하이브리드 전극은 곡면·유연 PDLC 스마트 윈도우 및 다양한 유연 전자 소자에 적용 가능한 유력한 전극 구조로 평가된다.

4 결론

본 연구에서는 ITO의 기계적 취성으로 인한 유연 소자 적용의 한계를 극복하기 위해, PEDOT:PSS에 디메틸 설폭사이드(DMSO)를 5 wt% 도핑하여 전기 전도도를 향상시킨 DPP(5 wt% DMSO-doped PEDOT:PSS) 층을 ITO 상부에 적층한 하이브리드 전극을 제작하였다. 먼저, 면저항 및 XPS 분석을 통해 5 wt% DMSO 도핑 조건이 전도도 향상과 구조적 안정성을 동시에 만족하는 것으로 나타났으며, 두께를 80–140 nm 범위에서 조절하며 박막을 형성한 후 특성을 평가한 결과 120 nm에서 550 nm 투과율 94.3%, 면저항 $116.1 \Omega/\text{sq.}$ 로 가장 높은 성능 지수(FOM, $4.8 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$)를 나타내어 최적 두께로 확인되었다. 이렇게 제작된 ITO/DPP-120 하이브리드 전극은 ITO 단일층 전극 대비 면저항이 $29 \Omega/\text{sq.}$ 에서 $23.3 \Omega/\text{sq.}$ 로 약 20% 개선되었으며, 가시광선 영역(550 nm 기준)에서는 ITO와 유사한 수준의 투과율을 유지하였다. ITO/DPP-120 하이브리드 전극을 적용한 PDLC 소자는 ITO 전극 대비 포화전압과 최대 투과율에서 근소한 열세를 보였으나, 곡률 반경 30 mm 조건에서 실시한 구부림 시험에서는 저항 변화율이 51.6%에서 25.1%로 뚜렷하게 감소하여 기계적 안정성이 크게 향상되었음을 확인하였다. 이러한 결과는 ITO/DPP-120 하이브리드 전극이 전기적·광학적 구동 특성의 근소한 저하에도 불구하고 기계적 유연성이 크게 향상되어, 종합적으로 우수한 성능을 갖춘 전극 구조임을 보여준다. 이는 곡면·유연 형태의 PDLC 스마트 윈도우를 비롯한 다양한 유연 전자 소자의 투명 전극으로서 본 하이브리드 전극이 지니는 높은 응용 잠재력을 시사한다.

ORCID

Eun Mi Kim

<https://orcid.org/0000-0001-7068-5891>

감사의 글

본 연구는 산업통상부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성(R&D, P0031595)”, 한국생산기술연구원 “차세대 모빌리티용 AI 융합 자가발전-충전 핵심 요소기술 개발(KITECH EH-26-0003)” 사업의 지원을 받아 수행된 연구 결과임.

Conflict of Interest

The authors have no conflicts of interest to declare.

Author Contributions

Eun Mi Kim: Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data Curation, Writing –Original Draft, Writing – Review & Editing, Visualization, Supervision.

Data Availability

Data available within the article or its supplementary materials.

References

- [1] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, *Sol Energy Mater Sol Cells*, **94**, 87 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.08.021>
- [2] C. M. Lampert, *Sol Energy Mater*, **11**, 1 (1984).
doi: [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(84\)90024-8](https://doi.org/10.1016/0165-1633(84)90024-8)
- [3] D. R. Rosseinsky and R. J. Mortimer, *Adv. Mater.*, **13**, 783 (2001).
doi: [https://doi.org/10.1002/1521-4095\(200106\)13:11<783::AID-ADMA783>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1521-4095(200106)13:11<783::AID-ADMA783>3.0.CO;2-D)
- [4] M. N. Mustafa, M. A. A. Mohd Abdah, A. Numan, A. Moreno-Rangel, A. Radwan, and M. Khalid, *Renew Sustain Energy Rev*, **181**, 113355 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113355>
- [5] Y. Ke, C. Zhou, Y. Zhou, S. Wang, S. H. Chan, and Y. Long, *Adv. Funct. Mater.*, **28**, 1800113 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201800113>
- [6] S. Nundy, A. Mesloub, B. M. Alsolami, and A. Ghosh, *J Clean Prod*, **301**, 126854 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126854>
- [7] A. Ghosh and B. Norton, *Renew Energy*, **126**, 1003 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.038>
- [8] S. J. Lee, S. H. Lee, H. W. Kang, S. Nahm, B. H. Kim, H. Kim, and S. H. Han, *Chem Eng J*, **416**, 129028 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129028>
- [9] E. Nishimura, T. Sasabayashi, N. Ito, Y. Sato, K. Utsumi, K. Yano, A. Kaijo, K. Inoue, and Y. Shigesato, *J. Appl. Phys.*, **46**, 7806 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1143/JJAP.46.7806>
- [10] M. Boehme and C. Charton, *Surf. Coat. Technol.*, **200**, 1 (2005).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.040>
- [11] K. A. Sierros, N. J. Morris, K. Ramji, and D. R. Cairns, *Thin Solid Films*, **517**, 2590 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.10.031>
- [12] D. Wan, A. Abliz, M. Su, C. Liu, C. Jiang, G. Li, H. Chen, T. Guo, X. Liu, and L. Liao, *IEEE Electron Device Lett*, **38**, 1540 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1109/LED.2017.2757144>
- [13] Y. Kim, S. K. Hyeong, Y. Choi, S. K. Lee, J. H. Lee, and H. K. Yu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 61413 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c17967>
- [14] Y. Han, Z. Hu, W. Zha, X. Chen, L. Yin, J. Guo, Z. Li, Q. Luo, W. Su, and C. Q. Ma, *Adv. Mater.*, **34**, 2110276 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202110276>
- [15] J. Han, C. Sung, C. Shin, Y. Kim, and T. Y. Kim, *Sol Energy Mater Sol Cells*, **249**, 112035 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112035>
- [16] E. Klein, K. Huber, O. Paul, and P. Ruther, *Thin Solid Films*, **693**, 137715 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.137715>
- [17] J. Quinson, *Front Nanotechnol*, **3**, 770281 (2021).
doi: <https://doi.org/10.3389/fnano.2021.770281>
- [18] Y. B. Kim, S. Park, and J. W. Hong, *Thin Solid Films*, **517**, 3066 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.112>
- [19] P. C. Wang and A. G. MacDiarmid, *Displays*, **28**, 101 (2007).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.04.006>
- [20] H. H. Khaligh, K. Liew, Y. Han, N. M. Abukhdeir, and I. A. Goldthorpe, *Sol Energy Mater Sol Cells*, **132**, 337 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.09.006>
- [21] D. J. Kim, D. Y. Hwang, J. Y. Park, and H. K. Kim, *J. Alloys Compd.*, **765**, 1090 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.285>
- [22] F. Liu, G. Wang, K. Pal, B. Zhan, S. Liu, D. Wen, and S. Ye, *J Nanosci Nanotechnol*, **15**, 9829 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1166/jnn.2015.11706>
- [23] S. H. Chung and H. Y. Noh, *Opt Express*, **23**, 32149 (2015).

- doi: <https://doi.org/10.1364/OE.23.032149>
- [24] V. Marinova, S. Petrov, B. Napoleonov, J. Mickovski, D. Petrova, D. Dimitrov, K. Y. Hsu, and S. H. Lin, *Mater Proc*, **4**, 65 (2021).
doi: <https://doi.org/10.3390/IOCN2020-07900>
- [25] Z. Chen, X. D. Chen, H. Wang, X. Li, L. Lin, K. Chen, H. Ci, X. Wu, Y. Zhang, Y. Zhang, and Z. Liu, *Adv. Electron. Mater.*, **3**, 1700212 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1002/aelm.201700212>
- [26] Y. Zhou and R. Azumi, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **17**, 493 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1080/14686996.2016.1214526>
- [27] G. Huseynova, Y. H. Kim, J. H. Lee, and J. Lee, *J Inf Display*, **21**, 71 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1080/15980316.2019.1707311>
- [28] E. Dauzon, A. E. Mansour, M. R. Niazi, R. Munir, D. M. Smilgies, X. Sallenave, C. Plesse, F. Goubard, and A. Amassian, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 17570 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b00934>
- [29] Y. Xia, K. Sun, and J. Ouyang, *Adv. Mater.*, **24**, 2436 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201104795>
- [30] M. Vosgueritchian, D. J. Lipomi, and Z. Bao, *Adv. Funct. Mater.*, **22**, 421 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.201101775>
- [31] P. Li, K. Sun, and J. Ouyang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 18415 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b04492>
- [32] R. Singh, J. Tharion, S. Murugan, and A. Kumar, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 19427 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b09476>
- [33] N. A. Shahrim, Z. Ahmad, A. W. Azman, Y. F. Buys, and N. Sarifuddin, *Mater Adv*, **2**, 7118 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1039/d1ma00290b>
- [34] Y. Xia and J. Ouyang, *J Mater Chem*, **21**, 4927 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1039/c0jm04177g>
- [35] G. Haacke, *J. Appl. Phys.*, **47**, 4086 (1976).
doi: <https://doi.org/10.1063/1.323240>
- [36] H. J. Jeong, H. Jang, T. Kim, T. Earmme, and F. S. Kim, *Materials*, **14**, 1975 (2021).
doi: <https://doi.org/10.3390/ma14081975>
- [37] S. H. Chang, C. H. Chiang, F. S. Kao, C. L. Tien, and C. G. Wu, *IEEE Photonics J*, **6**, 4 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2014.2331254>
- [38] W. Wang, W. Chen, Y. Peng, Y. Zhang, Q. Yan, T. Guo, X. Zhou, and C. Wu, *Sci. Rep.*, **12**, 17442 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-21172-w>
- [39] N. Cui, Y. Song, C. H. Tan, K. Zhang, X. Yang, S. Dong, B. Xie, and F. Huang, *npj Flex. Electron.*, **5**, 31 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00127-7>
- [40] K. Lim, S. Jung, J. K. Kim, J. W. Kang, J. H. Kim, S. H. Choa, and D. G. Kim, *Sol EneOrgy Mater Sol Cells*, **115**, 71 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.03.028>
- [41] V. Raman, J. E. Lee, and H. K. Kim, *J. Alloys Compd.*, **903**, 163799 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163799>
- [42] J. H. Yoo, Y. Kim, M. K. Han, S. Choi, K. Y. Song, K. C. Chung, J. M. Kim, and J. Kwak, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 15928 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.5b03855>
- [43] J. Y. Park and H. K. Kim, *RSC Adv.*, **8**, 36549 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1039/c8ra07033d>