

REVIEW

나노와이어 투명전극 용액공정

박모세¹, 강성훈^{2*}

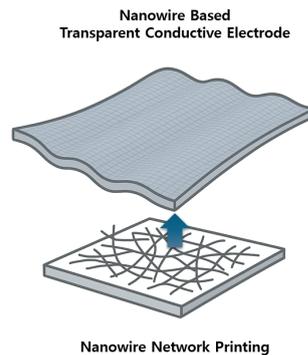
¹성균관대학교 지능형패뮤파크융합전공, ²한국과학기술원 신소재공학과

Transparent Electrodes Using Solution-Processed Nanowires

Mose Park¹, Sung Hoon Kang^{2*}

¹Department of Smart Fab Technology, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

²Department of Materials Science and Engineering, KAIST, Daejeon, Korea



ABSTRACT

Indium tin oxide (ITO), the conventional material used for transparent conductive electrodes (TCEs), has several drawbacks. These include its high cost, brittleness and the need for high-temperature, vacuum-based processing. This has driven the search for alternative materials that are suitable for cost-effective, large-area and low-temperature solution processing, particularly for flexible electronics. One-dimensional (1D) nanomaterials, such as metallic nanowires (Ag, Cu and Au) and carbon nanotubes (CNTs), have emerged as promising candidates thanks to their excellent electrical conductivity, high transparency and superior mechanical flexibility. This review explores the overall research trend of nanowire-based TCEs fabricated through solution processes. Various random network printing methods (spin coating, spray coating and inkjet printing) and oriented network fabrication techniques (Langmuir-Blodgett, templating and brushing) are investigated for their ability to enhance the electrical and optical properties of the resulting transparent electrodes. Advancements in material stability, network uniformity and scalability are expected to play a significant role in the production of next-generation flexible electronic devices for commercial use.

Key Words: Transparent conductive electrode (TCE), Nanowire, Solution process, Printed electronics

*Correspondence: shkang2024@kaist.ac.kr



1. 서론

투명 전극(transparent conductive electrode, TCE)은 평판 디스플레이, 태양전지, 광 검출기 등 다양한 광전자 장치에서 필수적인 요소로서 빛이 통과하며 전하가 수집 방출 되기 위하여 충분한 광학적 특성, 전기전도성, 기계적 적합성을 지녀야 한다[1]. 전통적으로 산화 인듐주석(ITO)은 뛰어난 광전기적 특성과 높은 투명도(90%), 낮은 면 저항($10 \Omega\text{sq}^{-1}$)을 제공하여 투명전극 연구의 주요 소재로서 지속적으로 탐구되어 왔다[2]. 하지만 ITO는 인듐 자체의 높은 비용, 재료의 취성, 그리고 고온 진공 기반 제조공정 필요성과 같은 단점으로 인하여 대체 재료의 연구가 요구되고 있다[3,4]. 또한 대면적, 대량 생산과 경제적인 제조과정으로의 확장을 위해 용액공정으로 활용이 가능한 대체 재료의 연구가 추진되어 왔다[5].

기존의 진공 증착 방식과 비교하여 용액공정은 다양한 강점이 존재한다. 첫째, 진공 증착에 비해 비용 효율성이 증가한다. 진공 장비 운용을 위한 비용에 비해 공정 단가가 낮고 및 에너지 효율이 높아 경제적이다. 대면적 기판에 재료를 도포할 수 있어 대량생산에도 유리하다[5-7]. 둘째, 유연 소자 제작에 요구되는 저온 공정 호환에 유리하다. 용액공정은 재료를 액체 상태로 처리하므로 낮은 온도에서 공정이 가능하며 이로 인해 고온 공정에 적합하지 않은 유연한 고분자 기판에 직접적인 소자 제작이 가능하다[8-10]. 셋째, 유연 및 신축성 전자소자 구현에 유리하다. 기존의 경직된 소자위의 증착보다 기계적, 구조적으로 높은 변형을 허용하는 자유로운 형태의 기판에도 균일하게 증착할 수 있다[11,12]. 따라서 이러한 이점을 활용한 용액 기반 투명전극 제조기술의 개발이 요구되어지고 있다.

이러한 용액공정을 활용한 다양한 기능을 수행하는 막(layer)을 만들 때 가장 중요한 것은 용액내의 재료의 특성이 잘 구현되며 균일한 품질의 막을 인쇄할 수

있는지 여부이다. 나노물질의 활용은 공정의 복잡성을 줄여주고, 저온 및 추가적인 에너지가 필요하지 않은 공정을 적용할 수 있게 해준다. 단결정으로 균일하게 생성된 나노 물질이 퍼콜레이션 네트워크(percolation network)를 형성할 수 있다면 용액을 적절한 위치에 프린팅하고 증발하는 과정만으로도 효과적인 막을 형성할 수 있다[13,14].

이러한 나노 물질은 형태에 따라 0차원, 1차원, 2차원 물질로 크게 구분할 수 있다[15,16]. 먼저 0차원인 나노입자의 경우 용액공정으로의 활용이 용이하지만 프린팅 시 균일성을 확보하기 어렵고 퍼콜레이션 네트워크를 형성하는데 많은 양의 재료가 필요하다는 단점을 지니고 있다. 2차원 물질인 graphene 같은 물질의 경우 대용량 합성 및 대면적 기판으로의 transfer 및 scaling의 한계점이 있다. 반면에 1차원 물질 나노와이어(nanowire)는 단결정의 방향성이 있는 electron path로 작용하기 때문에 전자 이동이 용이하며 grain boundary에서의 결함이나 산란을 최소화한다. 또한 aspect ratio가 길수록 퍼콜레이션 임계값이 낮아 적은 재료의 양으로도 효과적인 네트워크를 형성하기에 용이하다[17,18]. 더불어 약한 반 데르 발스 결합을 통해 서로 연결되거나 배열될 수 있어 높은 기계적 변형이 가능하여 유연하고 신축성 있는 전자 소자용 재료로서 매우 적합하다[19,20]. 따라서 1차원 나노물질인 나노와이어를 활용한 효율적인 네트워크 형성에 대한 연구가 최근에 많은 진전을 이루고 있다. 가장 유망하며 활발하게 이루어지는 연구 방향으로서 금속 나노와이어(은, 구리, 금) 및 탄소 기반 나노 구조(탄소 나노 튜브)와 같은 1차원 나노 물질의 활용이 주목을 받고 있다. 이러한 나노 물질은 높은 전기 전도도, 광 투명도, 기계적 유연성을 제공하여 유연 투명전극소재로서 적합하다. 따라서 본 리뷰는 나노와이어 네트워크의 성능을 좌우하는 요소, 다양한 나노 물질, 그리고 무작위 및 정렬된 네트워크 프린팅 공정을 탐구하여 용액공정



을 통한 나노와이어 투명 전극의 전체적인 연구의 흐름을 살펴볼 것이다.

2. 투명전극의 중요 물성

2.1. 네트워크의 면 저항

나노와이어 네트워크 기반 투명 전극의 전기 전도도는 근본적으로 퍼콜레이션(percolation) 개념에 의해 지배된다. 퍼콜레이션이란 농도의 변화에 따라 선택적 영역에서 연속적인 전도성 경로가 최소한 1개 이상 존재하는지 판가름하는 개념이며, 퍼콜레이션 임계 농도란 최소 1개의 연속적 전도성 루트를 형성시켜줄 있는 최소한의 농도이다[21,22]. 무작위한 방향설정, 모든 geometry가 동일하다는 가정하에 1차원 물질의 퍼콜레이션 임계 농도는 다음과 같은 식을 따른다[23].

$$n_c \cdot L^2 = 5.637(n_c: \text{임계 농도}, L: \text{길이}) \quad (1)$$

이 식에 따르면 와이어의 길이가 길수록 퍼콜레이션 임계농도는 감소하며 더 낮은 농도에서 연속적인 전자 수송루트를 확보할 수 있다. 또한 임계농도 이상의 농도로 와이어를 랜덤하게 분포 시킨다면 전체적인 네트워크의 전도성은 농도의 지수함수를 따르게 되고 이론적인 식은 다음과 같다[24].

$$\sigma \propto (n - n_c)^\beta \quad (2)$$

(σ : 전도성, n : 농도, n_c : 임계농도, β :보편적 전도도 지수, 이차원 네트워크의 경우 약 1.29)

이론적인 2차원 네트워크에서 β 는 약 1.3이다. 추가적인 이론적 연구로 와이어의 각도 분포(와이어의 정렬), 길이 분포, curvature에 따른 임계농도의 변화를 연구한 사례가 있다[18]. 하지만 이러한 이론적인 연구의 한계는 실제 소자에서 재료의 특성 편차와 용액공정에서 작용하는 hydrodynamics가 고려되지 않았다는 점이며, 임계농도를 넘어 많은 junction이 생겼을 때

접촉 저항을 비롯한 전체 네트워크의 형태가 네트워크의 전기적 수송 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정으로 실제적인 소자에 적용된 네트워크를 고려한 연구가 필요하다[25,26].

2.2. 투과율

광 투과율은 전극 물질을 통과하는 빛의 백분율을 나타내며, 투명 전극의 핵심 성능 지표 중 하나이다. 투명 전극은 디스플레이, 태양 전지, LED 등 다양한 광전자 장치에서 빛의 효율적인 통과를 보장해야 하므로, 가시광선 범위(380-780 nm)에서 높은 투과율(일반적으로 80% 이상)이 필수적이다. 나노와이어 기반 투명 전극에서 투과율은 여러 요인에 의해 결정된다[27].

- 나노와이어 밀도 및 형태: 투과율은 나노와이어의 밀도, 직경, 길이, 그리고 네트워크의 균일성에 크게 영향을 받는다. 일반적으로 나노와이어 밀도 혹은 직경이 증가하면 면 저항은 감소하지만, 빛의 산란 및 흡수가 증가하여 투과율은 감소하는 상충 관계를 이룬다[28].
- 국부 표면 플라즈몬 공명(localized surface plasmon resonance, LSPR) 효과: 금속 나노와이어는 특정 파장에서 국부 표면 플라즈몬 공명(LSPR)을 나타낼 수 있으며, 이는 빛의 흡수 및 산란을 증가시켜 투과율에 영향을 미친다. 나노와이어의 두께 대 폭 비율을 증가시키면 LSPR 효과를 줄이거나 이를 비가시 영역으로 이동시켜 투과율을 향상시킬 수 있다[29].
- 결함 및 응집: 탄소 나노튜브(CNT) 필름의 경우, 튜브의 피할 수 없는 결함, 튜브 간 번들링(bundling), 금속성 및 반도체성 CNT의 혼합은 투과율을 저해할 수 있다.

2.3. Figure of Merit(FOM, 성능지수)

성능 지수(figure of merit, FOM)는 투명 전극의 전



반적인 성능을 정량적으로 평가하기 위해 전기 전도도와 광 투과율을 결합한 포괄적인 지표이다. 이는 다양한 재료와 공정으로 제작된 투명 전극의 성능을 표준화된 방식으로 비교할 수 있게 해준다. FOM 값이 높을수록 해당 전극의 성능이 우수함을 의미한다.

Haacke가 제안한 성능지수(FOM)는 다음과 같이 정의된다[30].

$$FOM = \frac{T^{10}}{R_s} \quad (3)$$

여기서 T 는 투과율, R_s 는 면저항이다.

상업적으로 광범위하게 활용되어지며 높은 투과율과 낮은 면저항을 지닌 ITO 샘플의 경우 FOM이 약 0.035이며 최적화를 통해 성능을 향상시킨 은 나노와이어 네트워크의 경우에 ITO와 근접한 FOM을 달성하였다(투과율 90%, 면저항 $10 \Omega\text{sq}^{-1}$)[31].

3. 투명전극의 재료

3.1. Ag Nanowires(은 나노와이어)

은 나노와이어(AgNWs)는 높은 전기 전도도로 인해 투명 전극의 매우 유망한 후보이다. AgNW 네트워크는 $10 \Omega\text{sq}^{-1}$ 미만의 면 저항과 90%의 광 투과율로 우

수한 특성을 달성하여 대부분의 응용 분야 요구 사항을 충족할 수 있다. 또한 매우 우수한 기계적 유연성을 보여 유연 전자 기기에 적합하다[32]. 그러나 드롭 캐스팅(drop casting) 시 커피링(coffee ring) 효과로 인한 증착 중 균일성 제어, 나노와이어 표면의 산화 및 접합부의 높은 접촉저항, PET와 같은 특정 기판에 대한 약한 접착력 등의 과제가 남아 있다. 이에 HCl 증기 배양과 같은 후처리를 통하여 산화된 표면을 제거하고 나노 웰딩(nano welding)을 통해 접촉저항을 낮추는 방식이 연구되었다[33]. UV 조사 용접 또한 나노와이어 접착을 개선하여 성능을 향상시킬 수 있으며, 380 nm UV 파장에서 $56.5 \Omega\text{sq}^{-1}$ 의 면 저항과 95.98%의 투과율을 달성하였다[34].

3.2. Carbon Nanotube(CNT, 탄소 나노튜브)

단일벽(SWCNT) 및 다중벽(MWCNT)의 탄소 나노튜브(CNTs)는 탁월한 기계적 및 전기적 특성을 가지며 작은 직경(SWCNT의 경우 약 1 nm)과 높은 종횡비(10^3)로 높은 투명도를 가진 전도성 네트워크를 쉽게 형성할 수 있게 한다. 이로 인하여 다양한 광전자 소자의 투명전극 소재로 적합하다[35]. 하지만 금속성, 반도체성 CNT의 혼재로 인해 전기적 성능 제어가 어렵고 접촉 저항이 차후 해결해야 할 문제로 남

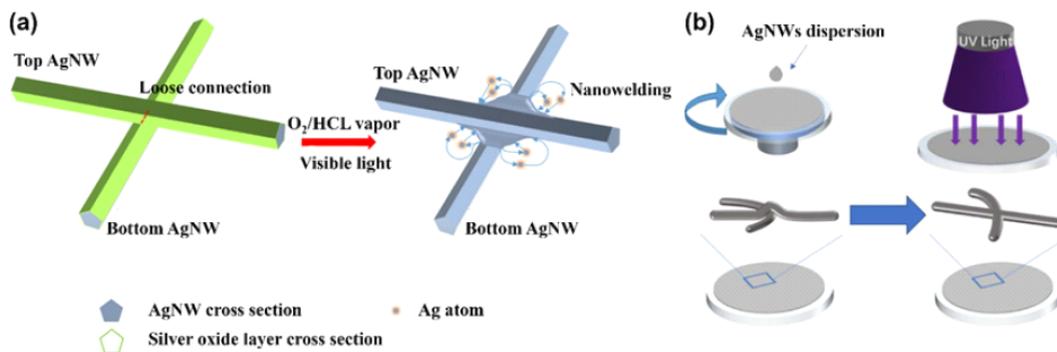


Fig. 1. (a) Nano-welding method using HCl vapor [33]. Copyright 2017 American Chemical Society. (b) Nano-welding method via UV irradiation [34]. Copyright 2022 MDPI.



아있다[36]. 또한 CNTs의 주요 과제는 반데르발스 힘으로 인해 응집되어 전도성을 방해하는 번들(bundle)을 형성하는 경향이 있다는 것이다[37]. 일반적인 용매에서 장기적으로 안정적인 분산을 달성하기는 어려우며, 분산을 위해 종종 표면 개질이나 계면활성제가 필요하다. CNT는 높은 전도도(100-1,000 S/cm)와 낮은 공정 온도(약 100°C)를 가지고 있지만, 그 성능이 항상 ITO 만큼 향상되지는 않았다(투과도 90% 이상, 면 저항 $10 \Omega\text{sq}^{-1}$ 이하). 그러나 분산 및 후처리 방법의 발전으로 상당한 개선이 이루어졌으며, 잉크젯 프린팅 된 CNT 필름은 뜨거운 질산 처리 후 $156 \Omega\text{sq}^{-1}$ 의 면 저항과 81%의 투과율을 달성했다[38]. 또한 카본 웰딩과 질산 후처리를 동시 차용하여 $25 \Omega\text{sq}^{-1}$ 의 면 저항과 90%의 투과율을 달성하였다[39].

3.3. 기타 금속 와이어

은 외에도 다른 금속 나노와이어가 투명 전극 재료로 탐구되고 있다[40].

구리 나노와이어(Cu NWs): 구리는 은보다 훨씬 저렴하지만 은과 거의 유사한 높은 고유 전기 전도도

(Cu: 59 MS/m, Ag: 63 MS/m)를 제공한다. 그러나 Cu NWs는 주변 환경에서 산화에 매우 취약하여 전도도와 안정성을 저해한다. SrSnO₃(STO) 층으로 효과적으로 덮는 것과 같은 전략은 높은 온도, 습도, 산화, 부식 및 황화에 대한 안정성을 향상시키면서 우수한 기계적 유연성과 접착력을 유지하는 방식이 개발되었다[41].

금 나노와이어(Au NWs): 금 나노와이어 또한 우수한 전기 전도도, 높은 투과율 및 뛰어난 유연성을 나타낸다. 그러나 은보다도 비싼 비용으로 인해 대규모 응용 분야에는 적합하지 않다.

4. Random Network 프린팅 공정

용액 공정으로 프린트 되기 전 나노와이어 혹은 나노튜브는 알코올, 물 기반의 용액 안에 랜덤하게 분산되어 있다. 용액이 기판위에 프린트되며 별도의 정렬과정이 존재하지 않는다면 용액이 증발하고 와이어로 구성된 얇은 필름이 남게 되며 랜덤 네트워크를 형성하게 된다. 대부분의 용액공정을 활용한 프린팅에서 이와 같은 현상이 관찰되며 그 중에서도 대표적인 용액공정 방식들로 형성된 네트워크의 연구에 대한 사례

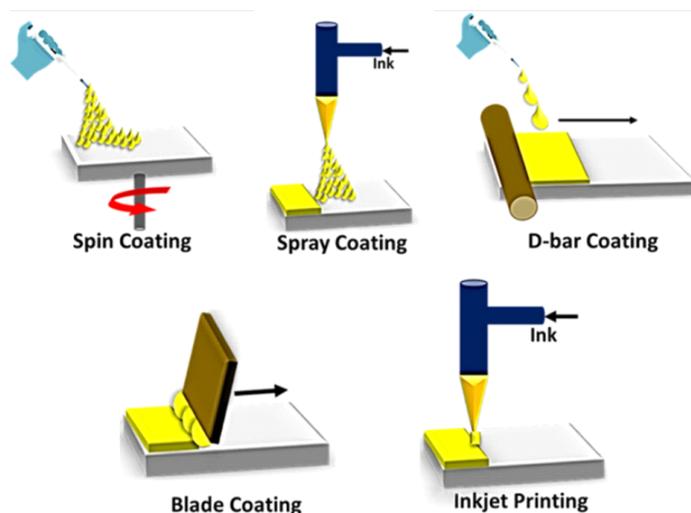


Fig. 2. Various solution-based processing methods [42]. Copyright 2022, Wiley-VCH GmbH.



들을 살펴보고자 한다.

4.1. 스핀코팅(Spin Coating)

스핀 코팅은 용액을 이용하여 박막을 간단하고 빠르게 증착하는 대표적인 방법 중 하나이다. 나노 물질이 분산된 용액이 기판 위에 분사된 후, 기판이 빠르게 회전하며 원심력에 의해 용액이 가장자리로 퍼지며 용액의 얇은 막이 형성되고 용매가 빠르게 증발한다. 간단한 구현이 장점이지만 나노와이어의 비균일한 도포를 초래하기 쉬워 일반적으로 대면적에 적용이 어렵다는 단점이 있다. 스핀 코팅을 통해 형성된 은 나노와이어 네트워크 투명전극은 면저항 $14.1 \Omega\text{sq}^{-1}$, 투과율 92.8%의 특성을 보였다[43].

4.2. 스프레이 코팅(Spray Coating)

스프레이 코팅은 나노와이어 용액에 압력을 가해 노즐을 통해 분사하며 기판을 코팅하는 방식으로 대량 증착에 적합하며 다양한 기판에 박막을 증착할 수 있다. 증착된 나노와이어의 밀도는 용액의 농도, 스프레이의 분사 압력, 노즐과 기판사이의 거리를 통해 조절되어진다. 기판과 와이어사이의 접촉력을 확보하고 공정의 최적화를 통하여 비균일한 네트워크의 형성을 피하고자 하는 연구가 진행되어지고 있다[44]. 스프레이 코팅을 통해 형성된 은 나노와이어 네트워크 투명전극은 면저항 약 $10 \Omega\text{sq}^{-1}$, 투과율 80%의 특성을 보였다 [45,46].

4.3. 바/블레이드 코팅(Bar/Blade Coating)

마이러 로드(Mayer rod) 혹은 블레이드를 사용하여 나노 물질 용액을 기판 위에서 밀어내며 용액의 얇은 막을 형성하고 증발시켜 나노 물질을 증착하는 방식이다. 보다 균일한 박막을 도포할 수 있으며, 균일성은 액체의 표면 장력, 점성, 증발 속도, 농도 등 여러 요인

에 따라 변화될 수 있다. 마이러 로드를 활용한 바 코팅을 통해 형성된 은 나노와이어 네트워크 투명전극은 면저항 $8 \Omega\text{sq}^{-1}$, 투과율 80%의 특성을 보였다[47]. 블레이드 코팅을 통해 형성된 은 나노와이어 네트워크 투명전극은 면저항 $50 \Omega\text{sq}^{-1}$, 투과율 90%의 특성을 보였다[48].

4.4. 잉크젯 프린팅(Inkjet Printing)

잉크젯 프린팅은 노즐에서 작은 잉크 방울을 분사하여 기판에 패턴을 형성하는 방식으로 재료의 수율이 좋으며 정밀 패턴닝(patterning)에 용이한 장점이 있다. 하지만 노즐로부터 용액이 막힘 없이 제팅(jetting) 되고 원하는 패턴을 형성하기 위한 용액과 프린팅 환경의 포괄적인 최적화가 필요하다. 또한 잉크젯 프린팅은 커피링 효과에 취약하여 인쇄된 패턴의 불균일한 증착과 비균일한 전기적 특성을 초래하는 단점을 지니고 있다[49].

각 공정별 장단점 및 전기적, 광학적 특성을 Table 1로 정리하였다.

5. Oriented Network 프린팅 공정

일반적인 랜덤 네트워크에서 높은 투과율과 낮은 면저항을 동시에 갖추기에는 한계가 존재한다. 높은 전도도를 얻기 위해 나노와이어의 밀도를 높이면 광학적 투과율이 낮아지기 때문이다. 하지만 정렬된 나노와이어 네트워크는 랜덤 네트워크에 비해 퍼콜레이션 한계 농도가 낮아 낮은 농도에서도 적절한 면저항을 갖는 네트워크를 형성할 수 있다. 따라서 다양한 방식이 활용된 정렬된 나노와이어 프린팅 공정에 대한 연구가 이루어지고 있다.

5.1. 커피링 효과(Coffee Ring Effect)

커피링 효과는 액적이 증발 중에 용매안의 용질이



Table 1. Advantages and disadvantages of each random network printing process and their electrical and optical properties

Printing process	Advantages	Disadvantages	Sheet resistance (Ωsq^{-1})	Transmission (%)
Spin coating	Simple deposition	Nonuniform deposition Difficult to scale up to large areas	14.1	92.8
Spray coating	Compatible with various substrates Suitable for large-scale deposition	Adhesion to substrate required Nonuniform deposition	10	80
Bar/Blade coating	Uniform deposition	Direct substrate contact	8/50	80/90
Inkjet printing	High material utilization Easy precise patterning	Limited choice of materials Controlled jetting conditions required	8	-

contact line 주변으로 이동하며 쌓여서 증발을 마친 후 링 모양 형태로 패턴이 남는 현상(Fig. 3a-上)을 이야기 한다. 이러한 현상은 droplet의 증발과정에서 contact line이 기판에 pinning되며 Contact line을 따라 evaporation flux가 가장 크게 되고 이로 인해 생긴 capillary flux로 인하여 용액 안의 용질이 contact line쪽으로 이동하게 되면서 발생하게 된다[53]. 이와 같은 커피링 효과는 contact line 주변으로 이동된 나노와이어의 정렬에도 영향을 미친다. contact line 주변에서 정렬된 나노와이어 mesh를 통하여 생성된 투명전극은 면저항 $25 \Omega\text{sq}^{-1}$, 투과율 97%의 성능을 보였다[50].

5.2. 랭뮤어-블로젯(Langmuir-Blodgett)

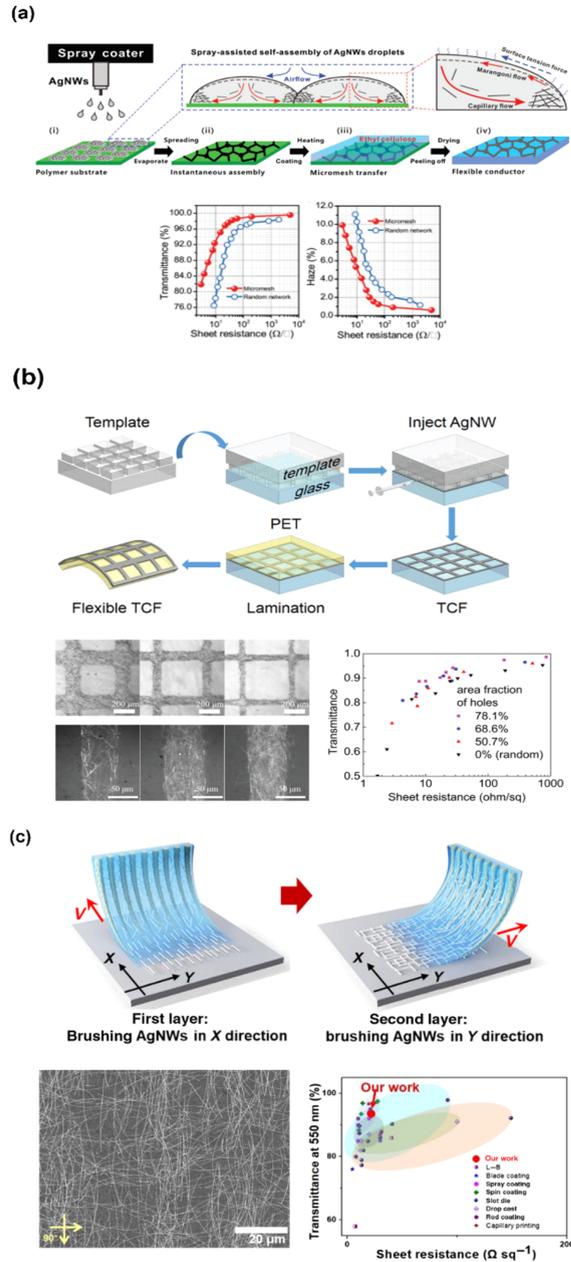


Fig. 3. (a) Silver nanowire mesh formed using the coffee-ring effect [50], Copyright 2018 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. (b) Grid-patterned nanowire network fabricated using a template [51], Copyright 2019 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim (c) Silver nanowire network formed by brushing [52], Copyright 2020 Chinese Chemical Society.



랭뮤어-블로젯 기술은 물 혹은 유기용매와 공기 계면 사이에 나노 물질의 단일층을 형성하며 자가 조립을 통해 나노 물질 간의 정렬이 이루어지는 과정이다. 정렬이 이루어지며 압축된 나노 물질 박막은 다양한 기판으로 전사되어 균일하고 고성능의 나노와이어 네트워크를 형성할 수 있다[54].

5.3. 템플릿(Template)

기계적인 크랙이 가해진 템플릿 혹은 아이스 템플릿과 같은 미리 패턴화된 템플릿을 사용하여 나노와이어의 정렬을 쉽게 유도할 수 있으며 원하는 그리드 형상을 가진 네트워크를 형성할 수 있다. 템플릿을 통해 생성된 square grid 네트워크의 면저항은 $36 \Omega \text{sq}^{-1}$, 투과율 95.2%를 달성하였다[51].

5.4. 브러싱(Brushing)

브러싱을 통하여 나노와이어 용액에 전단력을 가하여 나노와이어의 정렬을 유도할 수 있다. 하지만 브러싱의 경우 높은 정렬도를 달성하기 어려우며 나노와이어의 변형을 초래할 수 있다. 하지만 아주 간단한 방식으로 와이어의 정렬을 유도할 수 있는 장점을 지니고 있다. 브러싱을 통해 생성된 은나노와이어 네트워크의 면저항은 $21.4 \Omega \text{sq}^{-1}$, 투과율 93.8%를 달성하였다[52]. 각 공정별 장단점 및 전기적, 광학적 특성을 Table 2로 정리하였다.

6. 결론 및 전망

본 리뷰는 ITO의 재료적, 기술적 한계를 뛰어 넘기 위하여 차세대 투명전극 소재로 각광 받고 있는 1차원 나노와이어의 용액공정을 통한 프린팅과 이를 통해 제작된 투명전극 성능에 대한 포괄적인 내용을 소개하였다. 은 나노와이어, 탄소 나노튜브, 기타 금속 나노와이어 등은 비용 효율성, 기계적 유연성 및 대면적 생산

Table 2. Advantages and disadvantages of each oriented network printing process and their electrical and optical properties

Printing process	Advantages	Disadvantages	Sheet resistance (Ωsq^{-1})	Transmission (%)
Coffee ring	Simple deposition	Nonuniform deposition	25	97
Langmuir-Blodgett	High degree of alignment Uniform deposition	Complex processing	-	-
Template	Formation of networks with desired geometries	Complex processing	36	95.2
Brushing	Simple deposition	Low degree of alignment Nanowire deformation	21.4	93.8

을 위한 측면에서 큰 장점을 지니고 있다. 또한 스프인 코팅, 스프레이 코팅, 잉크젯 프린팅과 같은 용액공정을 통하여 형성된 랜덤한 나노와이어 네트워크들은 투명전극으로 활용되기 적절한 전기적 특성(면저항), 광학적 특성(투과율)을 지녔다. 더불어 커피링 효과를 활용하거나 랭뮤어 블로젯, 템플릿 방식 등을 적용하여 와이어의 정렬을 유도하고 이로 인해 투명전극의 전기적, 광학적 특성의 향상에 기여하는 연구가 최근까지 이루어졌다. 이러한 발전에도 불구하고 재료의 안정성, 네트워크의 균일도 및 신뢰성, 대량생산으로의 확장성 등은 핵심과제로 남아있다. 이러한 과제의 해결을 통해 나노와이어 기반 투명 전극은 차세대 플렉서블 전자소자의 상용화에 크게 기여할 것으로 기대된다.

기호설명

TCE: Transparent conductive electrode



ITO: Indium tin oxide
LSPR: Localized surface plasmon resonance
CNT: Carbon nanotube
FOM: Figure of merit
NW: Nanowire
SWCNT/MWCNT: Single wall/Multi wall carbon nanotube

ACKNOWLEDGEMENTS

Author Contributions

PMS drafted the manuscript. KSH reviewed and revised the manuscript. All authors read and approved the final manuscript.

Funding

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2020R1A5A1019649), Johns Hopkins University Discretionary Fund, KAIST Start-Up, and the Brain Pool Plus program (award number: RS-2024-00439827) through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT.

Declarations of Competing Interests

The authors declare that they have no competing interests.

AUTHORS



박모세
2012~2019년: 성균관대학교 물리학과 학사
2019~2025년: 성균관대학교 지능형팹 테크융합전공 석박사 통합과정
[관심분야] 유연전자, 나노소재, 박막트렌지스터



강성훈
1994~2000년: 서울대학교 재료공학부 학사
2000~2004년: Massachusetts Institute of Technology, Materials Science and Engineering 석사
2007~2012년: Harvard University, Applied Physics 박사
[관심분야] 유연전자, Bioinspired Materials, Metamaterials

REFERENCES

- [1] Ginley, D. S.; Perkins, J. D. Transparent Conductors. In Handbook of Transparent Conductors. Springer. 2010; p 1-25.
- [2] Ye, S.; Rathmell, A. R.; Chen, Z.; Stewart, I. E.; Wiley, B. J. Metal Nanowire Networks: The Next Generation of Transparent Conductors. Adv. Mater. 2014, 26, 6670-6687.
- [3] Hecht, D. S.; Hu, L.; Irvin, G. Emerging Transparent Electrodes Based on Thin Films of Carbon Nanotubes, Graphene, and Metallic Nanostructures. Adv. Mater. 2011, 23, 1482-1513.
- [4] Ellmer, K. Past Achievements and Future Challenges in the Development of Optically Transparent Electrodes. Nat. Photonics. 2012, 6, 809-817.
- [5] Zhang, Y.; Ng, S. W.; Lu, X.; Zheng, Z. Solution-Processed Transparent Electrodes for Emerging



- Thin-Film Solar Cells. *Chem. Rev.* 2020, 120, 2049-2122.
- [6] Tung, V. C.; Allen, M. J.; Yang, Y.; Kaner, R. B. High-Throughput Solution Processing of Large-Scale Graphene. *Nat. Nanotechnol.* 2009, 4, 25-29.
- [7] Arias, A. C.; MacKenzie, J. D.; McCulloch, I.; Rivnay, J.; Salleo, A. Materials and Applications for Large Area Electronics: Solution-Based Approaches. *Chem. Rev.* 2012, 110, 3-24.
- [8] Park, J. W.; Kang, B. H.; Kim, H. J. A Review of Low-Temperature Solution-Processed Metal Oxide Thin-Film Transistors for Flexible Electronics. *Adv. Funct. Mater.* 2020, 30, 1904632.
- [9] Tung, V. C.; Chen, L. M.; Allen, M. J.; Wassei, J. K.; Nelson, K.; Kaner, R. B. et al. Low-Temperature Solution Processing of Graphene-Carbon Nanotube Hybrid Materials for High-Performance Transparent Conductors. *Nano Lett.* 2009, 9, 1949-1955.
- [10] Jeong, S.; Moon, J. Low-Temperature, Solution-Processed Metal Oxide Thin Film Transistors. *J. Mater. Chem.* 2012, 22, 1243-1250.
- [11] Li, D.; Lai, W.; Zhang, Y.; Huang, W. Printable Transparent Conductive Films for Flexible Electronics. *Adv. Mater.* 2018, 30, 1704738.
- [12] Meng, L.; Wang, W.; Xu, B.; Qin, J.; Zhang, K.; Liu, H. Solution-Processed Flexible Transparent Electrodes for Printable Electronics. *ACS Nano.* 2023, 17, 4180-4192.
- [13] Franklin, A. D. Nanomaterials in Transistors: From High-Performance to Thin-Film Applications. *Science.* 2015, 349, aab2750.
- [14] Wu, W. Inorganic Nanomaterials for Printed Electronics: A Review. *Nanoscale.* 2017, 9, 7342-7372.
- [15] Liao, L.; Kovalska, E.; Regner, J.; Song, Q.; Sofer, Z. Two-Dimensional van der Waals Thin Film and Device. *Small.* 2024, 20, 2303638.
- [16] Yao, S.; Zhu, Y. Nanomaterial-Enabled Stretchable Conductors: Strategies, Materials and Devices. *Adv. Mater.* 2015, 27, 1480-1511.
- [17] Mutiso, R. M.; Sherrott, M. C.; Rathmell, A. R.; Wiley, B. J.; Winey, K. I. Integrating Simulations and Experiments to Predict Sheet Resistance and Optical Transmittance in Nanowire Films for Transparent Conductors. *ACS Nano.* 2013, 7, 7654-7663.
- [18] Langley, D. P.; Lagrange, M.; Nguyen, N. D.; Bellet, D. Percolation in Networks of 1-Dimensional Objects: Comparison between Monte Carlo Simulations and Experimental Observations. *Nanoscale Horiz.* 2018, 3, 545-550.
- [19] Xu, F.; Zhu, Y. Highly Conductive and Stretchable Silver Nanowire Conductors. *Adv. Mater.* 2012, 24, 5117-5122.
- [20] Amjadi, M.; Pichitpajongkit, A.; Lee, S.; Ryu, S.; Park, I. Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensor Based on Silver Nanowire-Elastomer Nanocomposite. *ACS Nano.* 2014, 8, 5154-5163.
- [21] Pike, G. E.; Seager, C. H. Percolation and Conductivity: A Computer Study. I. *Phys. Rev. B* 1974, 10, 1421.
- [22] Seager, C. H.; Pike, G. E. Percolation and Conductivity: A Computer Study. II. *Phys. Rev. B* 1974, 10, 1435.
- [23] Li, J.; Zhang, S. L. Finite-Size Scaling in Stick Percolation. *Phys. Rev. E* 2009, 80, 040104.
- [24] Zvezelj, M.; Stankovic, I. From Percolating to Dense Random Stick Networks: Conductivity Model



- Investigation. *Phys. Rev. B* 2012, 86, 134202.
- [25] Guo, C. F.; Ren, Z. Flexible Transparent Conductors Based on Metal Nanowire Networks. *Mater. Today* 2015, 18, 143-154.
- [26] Charvin, N.; Resende, J.; Papanastasiou, D. T.; Munoz-Rojas, D.; Jimenez, C.; Flandin, L. et al. Dynamic Degradation of Metallic Nanowire Networks under Electrical Stress: A Comparison between Experiments and Simulations. *Nanoscale Adv.* 2021, 3, 675-681.
- [27] Kuang, P.; Park, J. M.; Leung, W.; Mahadevaparam, R. C.; Nalwa, K. S.; Constant, K. et al. A New Architecture for Transparent Electrodes: Relieving the Trade-Off between Electrical Conductivity and Optical Transmittance. *Adv. Mater.* 2011, 23, 2469-2473.
- [28] Khanarian, G.; Joo, J.; Liu, X. Q.; Eastman, P.; Werner, D.; Trefonas, P. et al. The Optical and Electrical Properties of Silver Nanowire Mesh Films. *J. Appl. Phys.* 2013, 114, 024302.
- [29] Kang, M. G.; Xu, T.; Park, H. J.; Luo, X.; Guo, L. J. Efficiency Enhancement of Organic Solar Cells Using Transparent Plasmonic Ag Nanowire Electrodes. *Adv. Mater.* 2010, 22, 4378-4383.
- [30] Haacke, G. New Figure of Merit for Transparent Conductors. *J. Appl. Phys.* 1976, 47, 4086-4089.
- [31] Kim, T. Y.; Kim, Y. W.; Lee, H. S.; Kim, H. K.; Yang, W. S.; Suh, K. S. Uniformly Interconnected Silver-Nanowire Networks for Transparent Film Heaters. *Adv. Funct. Mater.* 2013, 23, 1250-1255.
- [32] Cui, N.; Song, Y.; Tan, C. H.; Zhang, K.; Yang, X.; Huang, F. et al. Stretchable Transparent Electrodes for Conformable Wearable Organic Photovoltaic Devices. *NPJ Flex. Electron.* 2021, 5, 31.
- [33] Liang, X. W.; Zhao, T.; Zhu, P. L.; Hu, Y. G.; Sun, R.; Wong, C. P. Room-Temperature Nanowelding of a Silver Nanowire Network Triggered by Hydrogen Chloride Vapor for Flexible Transparent Conductive Films. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2017, 9, 40857-40867.
- [34] Wang, S.; Liu, H.; Pan, Y.; Xie, F.; Zhang, Y.; Gao, F. et al. Performance Enhancement of Silver Nanowire-Based Transparent Electrodes by Ultraviolet Irradiation. *Nanomaterials* 2022, 12, 2956.
- [35] Ilatovskii, D. A.; Gilshtein, E. P.; Glukhova, O. E.; Nasibulin, A. G. Transparent Conducting Films Based on Carbon Nanotubes: Rational Design toward the Theoretical Limit. *Adv. Sci.* 2022, 9, 2201673.
- [36] Blackburn, J. L.; Barnes, T. M.; Beard, M. C.; Kim, Y. H.; Tenent, R. C.; Heben, M. J. et al. Transparent Conductive Single-Walled Carbon Nanotube Networks with Precisely Tunable Ratios of Semiconducting and Metallic Nanotubes. *ACS Nano* 2008, 2, 1266-1274.
- [37] Mustonen, K.; Laiho, P.; Kaskela, A.; Susi, T.; Nasibulin, A. G.; Kauppinen, E. I. Uncovering the Ultimate Performance of Single-Walled Carbon Nanotube Films as Transparent Conductors. *Appl. Phys. Lett.* 2015, 107, 143113.
- [38] Shimoni, A.; Azoubel, S.; Magdassi, S. Inkjet Printing of Flexible High-Performance Carbon Nanotube Transparent Conductive Films by "Coffee Ring Effect". *Nanoscale.* 2014, 6, 11084-11089.
- [39] Jiang, S.; Hou, P. X.; Chen, M. L.; Wang, B. W.; Sun, D. M.; Cheng, H. M. et al. Ultrahigh-Performance Transparent Conductive Films of Carbon-Welded Isolated Single-Wall Carbon Nano-



- tubes. *Sci. Adv.* 2018, 4, eaap9264.
- [40] Jung, H.; Lee, W.; Kang, J. Recent Progress in Printing Conductive Materials for Stretchable Electronics. *J. Flex. Print. Electron.* 2022, 1, 137-153.
- [41] Liu, K. L.; Liu, X.; Dong, Q.; Song, L.; Liang, X.; Yu, S. et al. Highly Reliable Strontium Tin Oxide/Copper Nanowire Composite Flexible Transparent Conductive Thin Films. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 2025, 36, 1111.
- [42] Popoola, A.; Oloore, L. E.; Popoola, I. K. A Demystified Guide on Fabrication and Characterization of Perovskites-Based Optoelectronic Devices. *Adv. Photonics Res.* 2022, 3, 2100122.
- [43] Song, M.; You, D. S.; Lim, K.; Park, S.; Jung, S.; Kang, J. et al. Highly Efficient and Bendable Organic Solar Cells with Solution-Processed Silver Nanowire Electrodes. *Adv. Funct. Mater.* 2013, 23, 4177-4184.
- [44] Akter, T.; Kim, W. S. Reversibly Stretchable Transparent Conductive Coatings of Spray-Deposited Silver Nanowires. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2012, 4, 1855-1859.
- [45] Garnett, E. C.; Cai, W.; Cha, J. J.; Mahmood, F.; Connor, S. T.; Brongersma, M. L. et al. Self-Limited Plasmonic Welding of Silver Nanowire Junctions. *Nat. Mater.* 2012, 11, 241-249.
- [46] Liang, F. C.; Chang, Y. W.; Kuo, C. C.; Cho, C. J.; Jiang, D. H.; Borsali, R. et al. A Mechanically Robust Silver Nanowire-Polydimethylsiloxane Electrode Based on Facile Transfer Printing Techniques for Wearable Displays. *Nanoscale.* 2019, 11, 1520-1530.
- [47] Hu, L.; Kim, H. S.; Lee, J. Y.; Peumans, P.; Cui, Y. Scalable Coating and Properties of Transparent, Flexible, Silver Nanowire Electrodes. *ACS Nano.* 2010, 4, 2955-2963.
- [48] Hwang, B.; An, Y.; Lee, H.; Lee, E.; Becker, S.; Kim, H. et al. Highly Flexible and Transparent Ag Nanowire Electrode Encapsulated with Ultra-Thin Al₂O₃: Thermal, Ambient, and Mechanical Stabilities. *Sci. Rep.* 2017, 7, 41336.
- [49] Finn, D. J.; Lotya, M.; Coleman, J. N. Inkjet Printing of Silver Nanowire Networks. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2015, 7, 9254-9261.
- [50] Xiong, J.; Li, S.; Ye, Y.; Wang, J.; Qian, K.; Lee, P. S. et al. A Deformable and Highly Robust Ethyl Cellulose Transparent Conductor with a Scalable Silver Nanowire Bundle Micromesh. *Adv. Mater.* 2018, 30, 1802803.
- [51] Hu, S.; Gu, J.; Zhao, W.; Ji, H.; Ma, X.; Li, M. et al. Silver-Nanowire Mesh-Structured Transparent Conductive Film with Improved Transparent Conductive Properties and Mechanical Performance. *Adv. Mater. Technol.* 2019, 4, 1900194.
- [52] Meng, L.; Zhang, M.; Deng, H.; Xu, B.; Wang, H.; Liu, H. et al. Direct-Writing Large-Area Cross-Aligned Ag Nanowires Network: Toward High-Performance Transparent Quantum Dot Light-Emitting Diodes. *CCS Chem.* 2021, 3, 2194-2202.
- [53] Deegan, R. D.; Bakajin, O.; Dupont, T. F.; Huber, G.; Nagel, S. R.; Witten, T. A. Capillary Flow as the Cause of Ring Stains from Dried Liquid Drops. *Nature* 1997, 389, 827-829.
- [54] Acharya, S.; Panda, A. B.; Belman, N.; Efrima, S.; Golan, Y. A Semiconductor-Nanowire Assembly of Ultrahigh Junction Density by the Langmuir-Blodgett Technique. *Adv. Mater.* 2006, 18, 210-213.