


금속층 두께에 따른 ITO/Ag/ITO 다층 투명 전극의 발열 특성 연구

민혜진, 강예지나, 손혜원, 신소현, 황민호, 이현용 

전남대학교 화학공학부

A Study on the Exothermic Properties of ITO/Ag/ITO Multilayer Transparent Electrode Depending on Metal Layer Thickness

Hye-Jin Min, Ye-Jina Kang, Hye-Won Son, So-Hyun Sin, Min-Ho Hwang, and Hyun-Yong Lee
School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

(Received August 23, 2021; Revised September 28, 2021; Accepted October 1, 2021)

Abstract: In this study, we investigated the optical, electrical and exothermic characteristics of ITO/Ag/ITO multilayer structures prepared with various Ag thicknesses on quartz and PI substrates. The transparent conducting properties of the ITO/Ag/ITO multilayer films depended on the thickness of the mid-layer metal film. The ITO/Ag (14 nm)/ITO showed the highest Haccke's figure of merit (FOM) of approximately $19.3 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$. In addition, the exothermic property depended on the substrate. For an applied voltage of 3.7 V, the ITO/Ag (14 nm)/ITO multilayers on quartz and PI substrates were heated up to 110 °C and 200 °C, respectively. The bending tests demonstrated a comparable flexibility of the ITO/Ag/ITO multilayer to other transparent electrodes, indicating the potential of ITO/Ag/ITO multilayer as a flexible transparent conducting heater.

Keywords: ITO/Ag/ITO, Exothermic characteristics, Haccke's FOM, Flexibility, Transparent heater

1. 서론

대표적인 투명 전도성 산화물(transparent conductive oxide, TCO)인 ITO는 높은 전기 전도성 및 광 투과율을 가지므로 터치패널, OLED, 태양 전지 등 다양하게 적용된다 [1]. 최근에는 빌딩의 창문이나 전기 자동차 분야에서 창문의 서리를 제거하는 투명히터로의 적용 가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [2]. 하지만 ITO 특성상 높은 시트 저항과 열악한 기계적 특성으로 인해 제한적으로 사용되고 있다 [3]. 또한 온도가 상승에 따른 발열이 균

일하지 못하고 글라스의 곡면 부분에서 유연성이 부족하여 크랙이 발생하는 단점이 있다. 이를 대체하기 위해 카본 나노 튜브(carbon nanotube), 그래핀(graphene), 은 나노 와이어(Ag nanowire), 산화물/금속/산화물(oxide/metal/oxide) 등이 연구되고 있다. 하지만 카본 나노 튜브와 그래핀은 높은 가시광선 투과도에 비해 면저항이 높기 때문에 투명히터의 적용에 적합하지 않다. 은 나노 와이어는 높은 가시광선 투과도와 낮은 면저항을 갖지만 면상 발열이 아닌 선상 발열로 발열 균일도가 떨어지고 열적 안정성과 장기 신뢰성이 취약하기 때문에 상업적 투명 히터로 적합하지 않다. 그러나 산화물/금속/산화물 구조의 경우 높은 가시광선 투과도와 낮은 면저항을 가질 뿐만 아니라 박막 내 균일한 면저항의 분포로 발열 특성이 균일하게 나타나며 대면적화가 가능하기 때문에 투명히터로서 적용 가능성이 높다 [4-7].

✉ Hyun-Young Lee; hyleee@chonnam.ac.kr

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

투명히터는 일반적으로 평판형 유리기판상에 제작되었으나 건물의 디자인, 자동차의 유리 등, 다양한 형태로 변화해 가고 있기 때문에 투명하면서도 유연한 특성을 가져야 한다. 투명전극을 이용한 투명히터의 경우 가시광 영역에서 투과도가 80% 이상이어야 하며 면저항은 $10^2 \Omega/\square$ 이하여야 한다. 투명히터에 전압을 인가할 시 온도가 급격히 상승하다가 일정한 온도를 보이는데 이를 포화온도라 한다. 줄의 법칙에 의해 온도는 전류와 공급된 시간에 비례하여 증가하여야 하지만 주변과의 온도 차이에 의한 열 손실이 일어나기 때문에 포화온도가 나타나게 된다. 이러한 포화온도는 저항의 특성에 민감하게 영향을 받기 때문에 낮은 면저항을 가질수록 보다 고성능의 히터로서 적용될 수 있다 [8]. 또한 투명 히터는 외부 환경과 급격한 온도 변화에 노출되므로 반복적인 발열 사이클 후에도 안정적인 성능을 보여야 한다.

본 연구에서는 기존의 ITO 단일 박막의 단점을 보완하고 ITO의 장점을 살리고자 Ag의 두께를 달리한 ITO/Ag/ITO 구조의 투명히터를 제작하고 박막의 유연 특성과 우수한 투명 전도 특성을 갖는 투명히터로의 적용 가능성을 모색하였다.

2. 실험 방법

13.56 MHz RF 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 quartz (1 mm-thick, 20×20 mm), p-type (100) Si (10×10 mm), glass (1 mm-thick, 15×25 mm), PI film (polyimide, 25 μ m-thick, 20×20 mm) 기판 상에 ITO/Ag/ITO 다층 박막을 제작하였다. Si 기판은 면저항 측정, glass 기판은 투과도 측정, quartz와 PI는 발열 특성을 평가하는 데 사용하였다. PI는 유리 전이온도(Tg)가

250~340°C로 다른 일반적인 고분자 물질보다 높고 유연하며 우수한 내열성을 가지고 있어 발열 특성 평가용 기판으로 사용하였다.

4 N의 순도를 갖는 ITO와 Ag 타깃을 사용한 마그네트론 스퍼터링을 이용하여 Ag 단일층 및 Ag/ITO/Ag 다층 박막 구조의 시료를 제작하였다. 스퍼터링 시간을 조절하여 상·하부층인 ITO의 두께는 30 nm로 고정하고 중간 금속층인 Ag의 두께는 각각 4, 6, 10, 14, 16 nm를 갖도록 하였다. 스퍼터링 전 공정이 진행되는 메인 챔버의 기저 진공은 로터리 펌프와 터보 분자 펌프를 이용하여 10^{-6} Torr까지 만들어 불순물을 제거해주고 이후 Ar 30 sccm을 흘려보내 10^{-3} Torr를 만들어 준 뒤 증착 공정을 진행하였다. 실제 증착 전 타깃 표면의 불순물을 제거해 주기 위해 10 분간 프리 스퍼터링을 충분히 진행하였다. 기판들은 중성 세제, 아세톤, 트리클로로에틸렌, 이소프로필알코올, 탈이온수를 이용하여 세척을 진행하였고, 단계마다 질소 가스로 건조하여 표면의 유기물을 제거하였다.

제작된 다층박막의 광 투과도는 자외선-가시광-적외선 분광광도계(UV-Vis-IR spectrophotometer, Shimadzu, U-3501)를 이용하여 300~800 nm 파장범위에서 측정하였고 박막의 표면 모폴로지 특성은 전계 방사형 주사현미경(FE-SEM, Hitachi S-4700)으로 확인하였으며 면저항은 4-point probe (CNT-series)를 이용하였다. Quartz와 PI 기판에 증착한 다층박막은 박막의 양 끝단에 Ag 페이스트를 도포하고 구리 테이프를 접착시킨 뒤 충분히 말려 주었고 이후 DC 전원 공급기(MK-3003 D/P)로 전원을 인가하여 나타나는 발열온도는 열화상 카메라(FLIR28)를 이용하여 측정, 발열 특성을 평가하였다. PI 기판에 증착한 다층박막의 경우 outer bending test를 통해 기판을 굽힌 뒤에도 충분한 발열이 되는지 확인하였다.

Table 1. Deposition parameters of ITO and Ag films.

Parameters	Top, bottom layers (ITO)	Middle layer (Ag)
Target	ITO (2 inch diameter)	Ag (99.99% purity, 2-inch diameter)
Sputtering mode	RF magnetron	RF magnetron
Ar gas flow rate [sccm]	30	30
RF power [W]	100	30
Base pressure [Torr]	3×10^{-6}	3×10^{-6}
Working pressure [Torr]	3×10^{-3}	3×10^{-3}
Temperature [K]	RT	RT
Thickness [nm]	30	4/6/10/14/16

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Si 기판에 증착된 Ag 금속 단일막 표면 모폴로지에 대한 SEM 이미지이다. 두께가 얇은 경우 Ag가 실리콘 기판 전면에 걸쳐 균일하게 분포하지 못하고 불연속적인 island 형태를 보이기 때문에 실리콘 기판이 부분적으로 드러나게 된다. 이는 증착 두께 4 nm 및 6 nm에서 보이는 검정색 빈틈을 통해 확인할 수 있다. 증착 두께가 10 nm 이상이 되면, 실리콘 기판 표면은 Ag로 잘 덮여 연속적인 표면을 갖는다. 따라서 10 nm 두께 부근에서 광·전기적 특성의 변화가 발생한다.

그림 2는 두께에 따른 Ag 단일박막의 면저항을 보여준다. Ag 단일박막의 두께가 4 nm인 경우에는 약 110 Ω/□, 10 nm 이상인 경우에는 8 Ω/□ 이하로 급격하게 감소하

고 포화값을 보였다. 면저항의 감소는 그림 1의 SEM image와 일치한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 두께 10 nm 이하의 박막의 경우 Ag 원자가 Si 기판을 완전히 덮지 못하기 때문에 국부적 전도(localized conduction)로 인한 상대적으로 높은 면저항을 보이는 반면에 10 nm 이상의 박막은 박막 전면에 걸친 Ag 원자분포로 인한 두께 의존, 낮은 면저항을 갖는다 [9].

그림 3은 유리기판에 제작된 두께별 Ag 단일박막의 가시광 파장영역에서의 투과도(안쪽 그림)와 550 nm 파장에서의 투과도 변화이다. 투과도 측정에 있어서 모든 박막의 기준 샘플은 세척된 유리기판으로 하였다. 모든 두께의 박막에 대해 약 320 nm 부근에서 최대의 투과도 값을 갖고 파장 증가에 따라 투과도가 감소하는 투과창 특성이 관찰되었다. 가시광 중심 파장인 550 nm에서의 투과

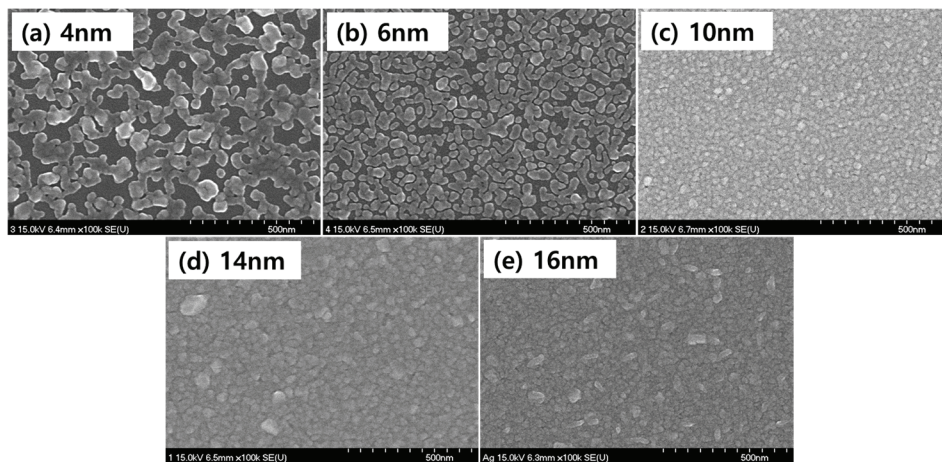


Fig. 1. FE-SEM images of the Ag thin films with various thickness.

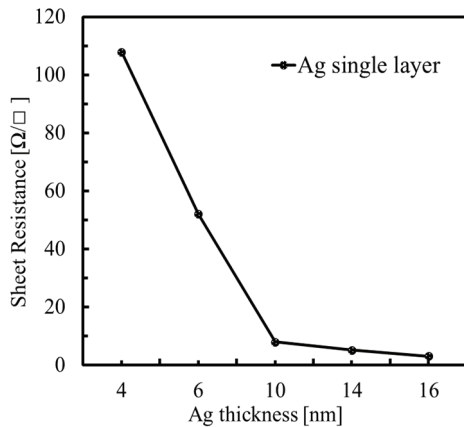


Fig. 2. Sheet resistance of Ag thin films as a function of the Ag thickness.

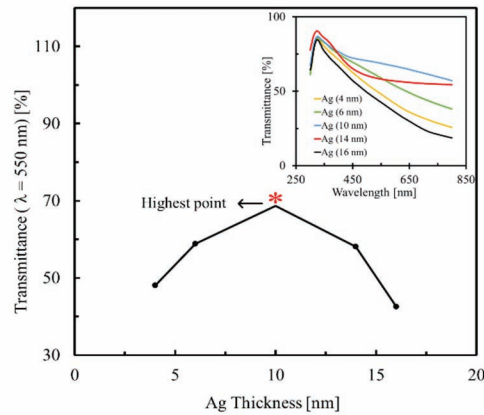


Fig. 3. Transmittance of the Ag thin films deposited on glass substrate as a function of thickness.

도 값은 Ag 단일박막의 두께가 10 nm인 경우 최고점으로 하는 포물선 형태를 나타냈다. 10 nm 이하의 두께에서 낮은 투과도를 보이는 이유는 island Ag에 의한 빛의 산란 때문이고 Ag층의 두께가 10 nm에서 island가 사라지게 되어 빛 산란 감소로 인한 높은 투과도를 보인다. 반면에 두께가 10 nm를 넘어가면 입사 빛의 흡수가 상대적으로 크게 일어나므로 투과도는 감소하는 것으로 생각할 수 있다 [10].

Ag 금속층의 두께에 따른 ITO/Ag/ITO 다층박막의 가시광 영역의 투과도, 면저항 및 성능지수 의존성은 그림 4에 나타내었다. 그림 4(b)의 위쪽 그래프인 파란선(●)은 550 nm 파장에서 투과도에 대한 Ag 두께 의존성으로 약 80%의 값을 가지며 10 nm 두께일 때 가장 높은 투과도를 보인다. 이는 그림 3의 Ag 단일박막의 투과도 경향과 일치한다. 다층박막 구조를 가지기 때문에 Ag 금속층에 의한 반사방지(antireflection) 효과가 발생하며, 이에 의해 입사 빛의 반사가 줄어들어 투과도가 기존 Ag 단일박막보다 높아지는 특징을 보인다 [11]. 그림 4(b)의 아래쪽 그래프인 붉은선(■)은 Ag 두께별 ITO/Ag/ITO 다층박막의 면저항(R_s)을 나타내고 있다. 산화물/금속/산화물의 면저항은 다음과 같은 식 (1)에 의해 표현된다.

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_O} + \frac{1}{R_M} + \frac{1}{R_O} \quad (1)$$

따라서 종합적인 면저항은 병렬저항 구조를 보이기 때문에 전체 저항 R_T 는 가장 낮은 면저항 특성을 갖는 금속 저항(R_M)에 의해 결정된다. 저항 특성 또한 단일박막의 저항 특성(그림 1)과 유사한 의존성을 보인다.

그림 4(c)는 ITO/Ag/ITO 다층박막의 성능지수를 금속층 두께에 따라 나타낸 것이다. 투명전극의 종합적인 성능은 Hack's figure of merit (FOM)에 의해 평가 평가된다 [12]. 식에서 T_{av} 는 550 nm에서의 투과도, R_s 은 면저항을 가리킨다. 따라서 다층박막에 대한 전기적 및 광학적 특성의 최적 조합을 검증하기 위해서는 적절한 투과도와 면저항이 요구된다.

$$\varphi_{TC} = \frac{T_{av}^{10}}{R_s} \quad (2)$$

그림 4(c)에서 보는 바와 같이 ITO/Ag/ITO 다층박막의 성능지수는 Ag 두께가 14 nm일 때 가장 높은 값인 약 $19.3 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 의 값을 갖는다.

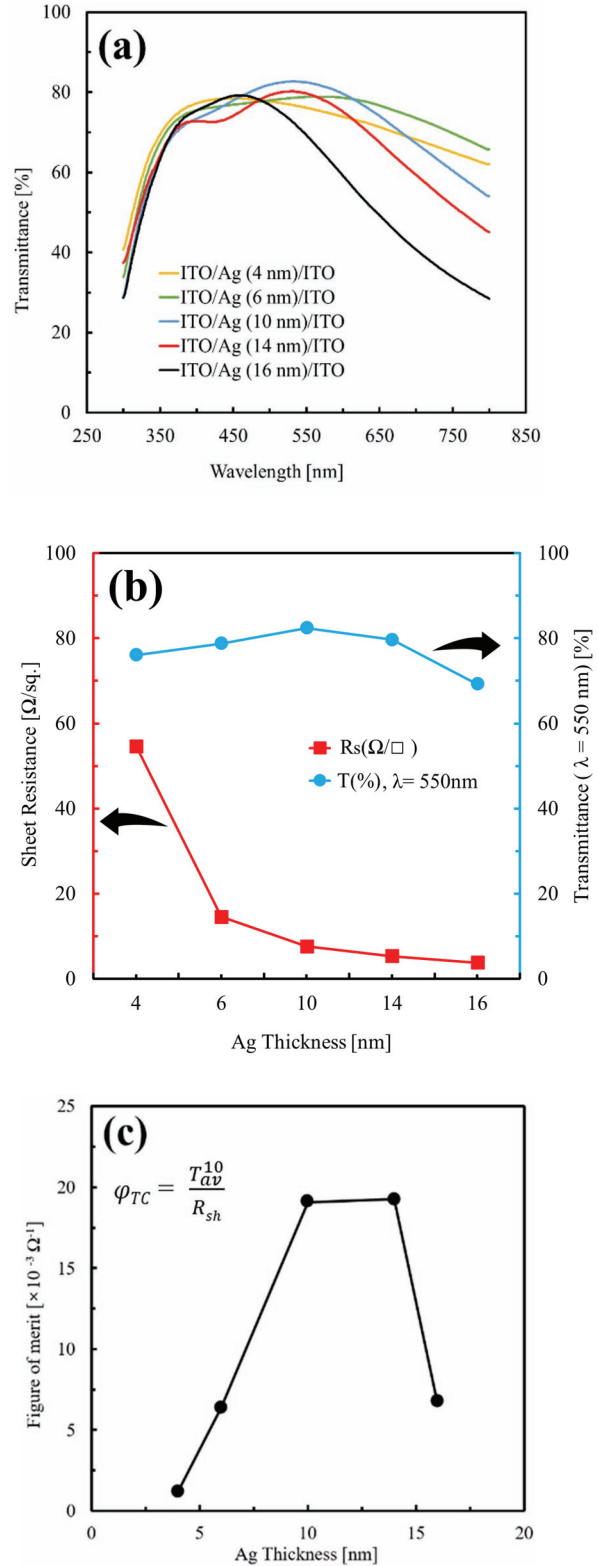


Fig. 4. Optoelectronic properties of ITO/Ag/ITO multilayer structure thin films with various Ag thickness: (a) transmittance spectra, (b) sheet resistance and transmittance, and (c) figure of merit.

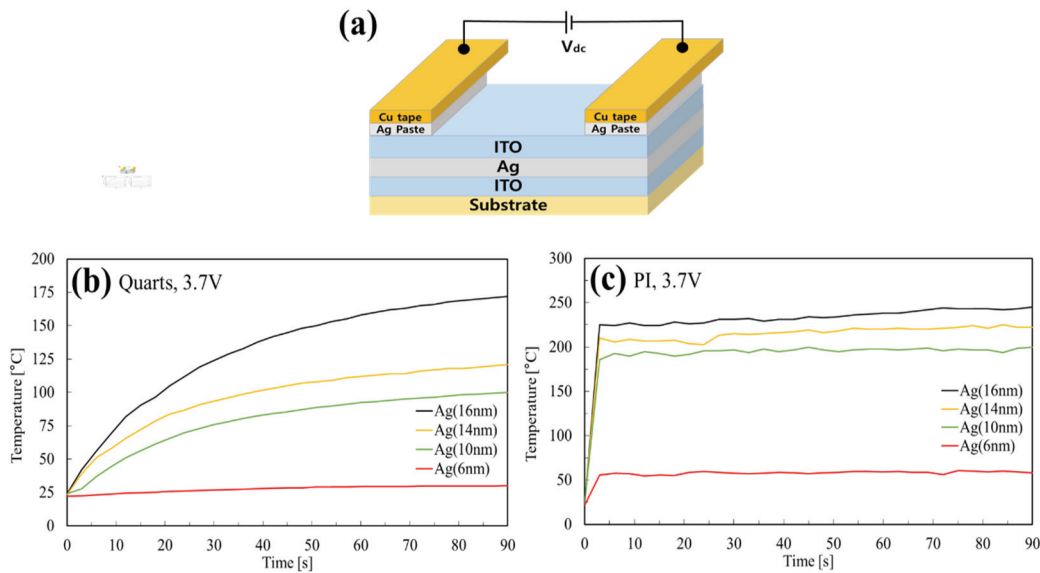


Fig. 5. (a) Schematic diagram of samples to evaluate exothermic profiles and the Ag-thickness dependent temperature profiles of the ITO/Ag/ITO on (b) quartz, and (c) PI substrates.

발열특성 측정을 위한 실험 개략도와 ITO/Ag/ITO 다층박막의 발열특성 결과를 그림 5에 보였다. 그림 5(a)에 서와 같이 ITO/Ag/ITO 다층박막의 양쪽 끝에 Ag 페이스트를 바른 후, 구리 테이프를 접착시켜 만든 전극을 통해 DC 전압을 인가시켰다. 그림 5(b)와 (c)는 각각 quartz와 PI 기판에 Ag 두께를 달리하여 제작된 ITO/Ag/ITO 다층박막에 3.7 V 전압을 인가한 경우의 발열 특성 그래프이다. 전압인가 시간에 따라 표면 온도가 증가한 후 포화하는 특성을 보였다. 이때 포화온도는 저항에 반비례하는 특성을 가지므로 Ag층의 두께가 증가할수록 저항 값이 낮아지고 [그림 4(b)] 포화온도는 증가하는 모습을 보인다 [13].

그림 6은 가장 높은 FOM 지수를 보이는 ITO/Ag (14 nm)/ITO 다층박막에 대해 인가 전압을 달리한 경우의 줄 발열 특성 그래프를 보여준다. 전원을 인가하였을 때 앞면 (성막된 부분)보다 뒷면에서 온도 상승이 잘 나타났기 때문에 뒷면으로 시간에 따른 온도를 측정하였다. 0.7 V부터 3.7 V까지 0.6 V 단위로 전압을 증가시키며 각각 전압마다 1분 30초 동안 전압을 인가하였다. 각각 전압에 대한 실험이 끝날 때마다 샘플이 상온까지 식을 수 있도록 충분한 시간을 둔 뒤 전압을 인가하여 실험을 진행하였고 모두 하나의 샘플로 실험하였기 때문에 반복적인 실험 후에도 발열이 잘 나타남을 알 수 있다. 그림 6(a)에서는 온도가 완만하게 증가하는 데 비해 그림 6(b)에서는 온도가 급격하게 증가함을 보인다. 이는 기판의 두께 및 열전도 특성에 기인한 결과로 특히, PI의 경우 두께가 25 μm , quartz의 경우 1 mm으로 두께로 약 40배 정도 차이가 나기 때문에 PI 기

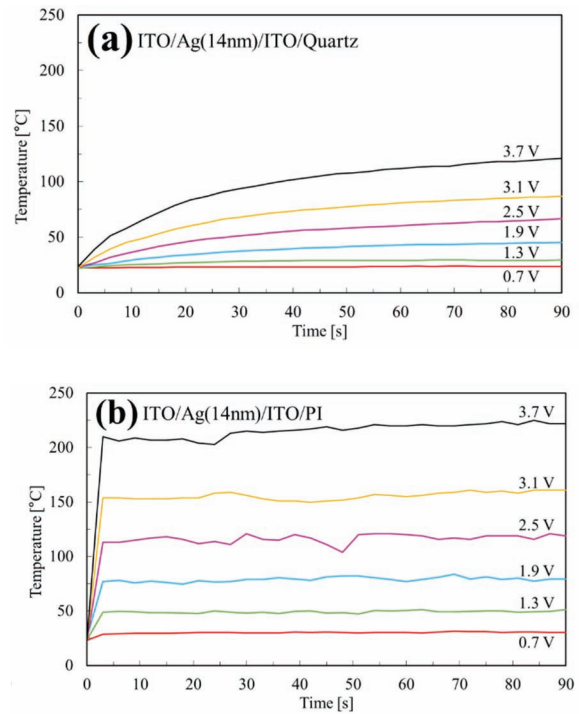


Fig. 6. Exothermic profiles of ITO/Ag (14 nm)/ITO on (b) quartz, and (c) PI substrates.

판에서 빠른 온도 상승 속도를 보이는 것으로 평가된다. 특히, 3.7 V 인가 시 PI와 quartz의 포화온도가 약 2배 차이가 나는데 이는 기판의 열전도 특성 차이에서 기인한 것으

로 보인다. Quartz와 PI 각각의 열전도율은 $1.35 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 와 $0.28\sim 0.34 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 으로 열전도율이 PI보다 더 큰 quartz는 기판 방향으로의 열전달이 많이 일어나 대류 방향으로의 열전달이 작기 때문에 PI보다 포화온도가 낮은 것으로 평가하였다.

그림 7은 ITO/Ag/ITO 다층박막의 발열특성과 비교하기 위한 ITO 단일박막(두께 140 nm)의 발열 특성을 평가한 것이다. Quartz 기판에 증착한 것으로 다층박막의 발열 실험과 같은 조건으로 실험하였다. 그림 6(a)와 비교해

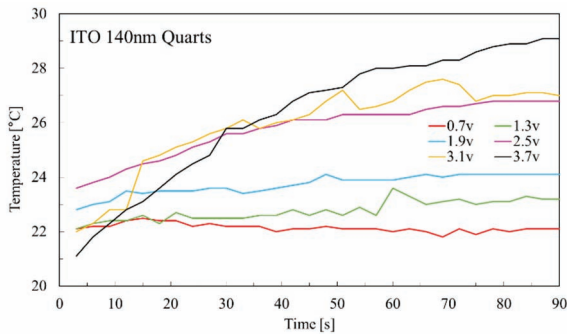


Fig. 7. Exothermic profile of a 140 nm thick ITO single layer on quartz.

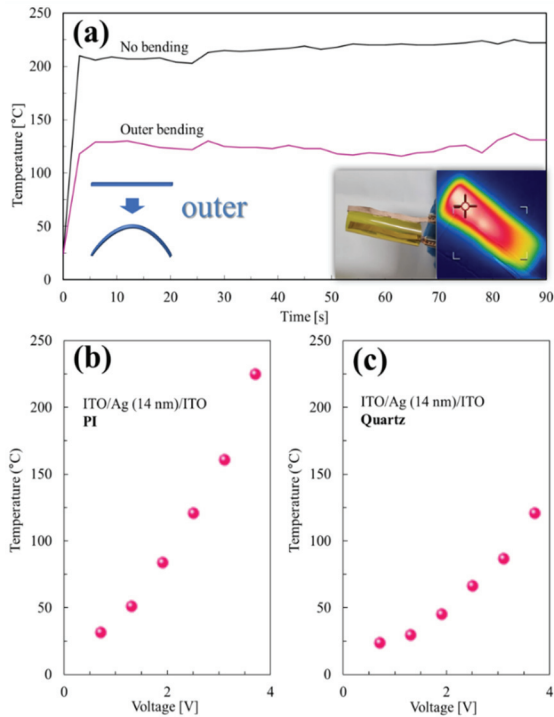


Fig. 8. (a) Exothermic profiles of the ITO/Ag/ITO/PI substrate obtained via bending test and voltage-dependent saturation temperatures of the ITO/Ag/ITO on (b) PI, and (c) quartz substrates.

보았을 때 온도가 균일하게 증가하지 않음을 보인다. 따라서 ITO 단일박막보다 다층박막에서의 발열이 더 안정적임을 알 수 있다.

투명 발열체의 유연성을 보기 위하여 추가적으로 PI 기판에서의 ITO/Ag (14 nm)/ITO 다층박막의 굽힘 발열 특성을 측정하였다. 그림 8(a)는 PI의 no bending과 outer bending의 발열 특성을 나타낸 것이다. Outer bending은 곡률이 약 1cm^{-1} 정도 되도록 굽혀 발열을 진행하였다. Outer bending에서의 포화온도가 no bending일 때보다 낮음을 보인다. 이는 포화온도가 면저항과 반비례하는 특성에서 기인된 것으로 곡률이 증가하면서 임계 굽힘 반지름을 초과하였기 때문에 면저항이 증가하여 더 낮은 포화온도를 갖는 것으로 평가된다 [13,14]. 그림 8(b), (c)는 PI와 quartz 기판에서의 전압에 따른 포화온도를 나타낸 것이다. 두 기판 모두 전압이 증가함에 따라 포화온도가 증가하는 비례곡선을 보인다. PI의 경우 대류 방향으로의 열전달이 크기 때문에 quartz일 때보다 각각의 전압에서 더 높은 포화온도를 갖는다.

그림 9는 ITO/Ag(14 nm)/ITO quartz 기판에서의 서리 제거 테스트를 보여준다. 그림 9(a)는 다층구조를 -20°C 에서 냉각시켜 서리를 형성시킨 직후의 모습이다. 균일한 서리 형성을 위해 하루 동안 냉동실에 보관하였다 [15]. 그림 9(b)는 (a)에 3.7 V의 전압을 인가하여 서리를 제거한 모습이다. 기판의 온도가 올라가면서 단시간에 서리가 사라지는 것을 확인하였다. 그림 9(c), (d)는 각각 (a), (b)의 표면을 열화상 카메라로 찍은 모습으로 급격한 온도 변화 이후에도 전압을 인가하였을 때 발열이 잘 나타남을 확인하였다.

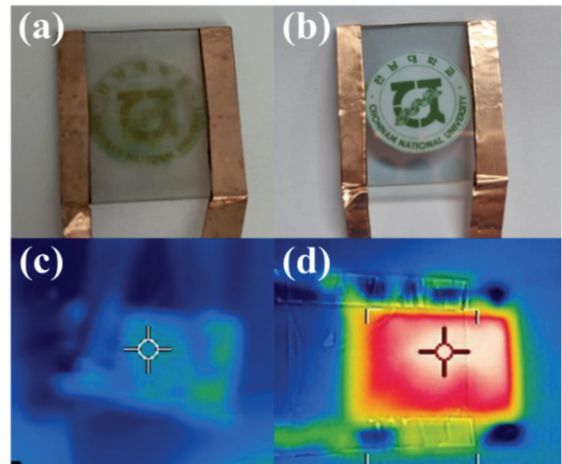


Fig. 9. Defrosting test results of the ITO/Ag/ITO multilayer before [(a), (c)] and after [(b), (d)] frost formation.

4. 결론

본 연구에서는 투명전극으로 가장 널리 사용되고 있는 ITO의 특성을 향상시키기 위하여 중간층에 Ag층을 삽입하여 다층구조 투명전극을 제작하였다. ITO의 두께는 30 nm로 고정하고 Ag층의 두께는 변화시키며 ITO/Ag/ITO 구조의 광, 전기적, 발열 특성을 평가하였다. 또한 Ag 단일층에 대해 SEM을 이용하여 표면 모폴로지 특성을 확인하였고, UV 분광기로 측정된 결과 Ag층의 두께가 10 nm 일 때 가장 높은 투과도를 보였다. 이는 다층박막 구조에서도 동일한 경향을 보였다. 제작된 ITO/Ag/ITO에 대해 DC 전압을 인가하여 발열 특성을 확인하여 면저항과 발열온도와의 관계를 확인하였다.

본 연구를 통해 제작된 ITO/Ag/ITO 구조층의 경우 Ag 두께 14 nm에서 $5.3 \Omega/\square$ 의 낮은 면저항과 약 80%의 높은 투과도, $19.3 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 의 가장 높은 투명전극 성능지수 값을 가진다. 이는 ITO 단일막의 성능지수인 $2.1 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ 보다 높은 값을 나타낸다. 발열 특성 평가를 통하여 발열온도는 기판의 종류 및 두께에 의존한다는 것을 확인하였고, ITO 단일박막과의 발열 특성 비교를 통해 성능의 향상을 확인하였다. 또한 성에·결로 실험을 통해 어플리케이션으로서의 적용 가능성을 확인하였다.

ORCID

Hyun Yong Lee

<https://orcid.org/0000-0003-4282-0616>

REFERENCES

- [1] C. Loka and K. S. Lee, *Appl. Surf. Sci.*, **415**, 35 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.11.082>]
- [2] D. T. Papanastasiou, A. Schultheiss, D. Muñoz-Rojas, C. Celle, A. Carella, J. P. Simonato, and D. Bellet, *Adv. Funct. Mater.*, **30**, 1910225 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201910225>]
- [3] W. Wang, M. Song, T. S. Bae, Y. H. Park, Y. C. Kang, S. G. Lee, S. Y. Kim, D. H. Kim, S. Lee, G. Min, G. H. Lee, J. W. Kang, and J. Yun, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 1551 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.201301359>]
- [4] J. Y. Lee, S. T. Connor, Y. Cui, and P. Peumans, *Nano Lett.*, **8**, 689 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nl073296g>]
- [5] Z. Wu, Z. Chen, X. Du, J. M. Logan, J. Sippel, M. Nikolou, K. Kamaras, J. R. Reynolds, D. B. Tanner, A. F. Hebard, and A. G. Rinzler, *Science*, **305**, 1273 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1101243>]
- [6] H. A. Becerril, J. Mao, Z. Liu, R. M. Stoltenberg, Z. Bao, and Y. Chen, *ACS Nano*, **2**, 463 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nm700375n>]
- [7] Q. Wan, E. N. Dattoli, W. Y. Fung, W. Guo, Y. Chen, X. Pan, and W. Lu, *Nano Lett.*, **6**, 2909 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1021/nl062213d>]
- [8] M. K. Roul, B. Obasogie, G. Kogo, J. R. Skuza, R. M. Mundle, and A. K. Pradhan, *J. Appl. Phys.*, **122**, 135110 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4992007>]
- [9] M. H. Hwang, H. Kong, J. W. Jeong, and H. Y. Lee, *Superlattices Microstruct.*, **141**, 106503 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2020.106503>]
- [10] S. Yu, W. Zhang, L. Li, D. Xu, H. Dong, and Y. Jin, *Acta Mater.*, **61**, 5429 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.05.031>]
- [11] R. Pandey, B. Angadi, S. K. Kim, J. W. Choi, D. K. Hwang, and W. K. Choi, *Opt. Mater. Express*, **4**, 2078 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1364/ome.4.002078>]
- [12] G. Haacke, *J. Appl. Phys.*, **47**, 4086 (1976). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.323240>]
- [13] S. H. Park, S. M. Lee, E. H. Ko, T. H. Kim, Y. C. Nah, S. J. Lee, J. H. Lee, and H. K. Kim, *Sci. Rep.*, **6**, 33868 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1038/srep33868>]
- [14] E. H. Ko, H. J. Kim, S. J. Lee, J. H. Lee, and H. K. Kim, *RSC Adv.*, **6**, 46634 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1039/c6ra08704c>]
- [15] S. Y. Lee and J. Y. Hwang, *Sci. Rep.*, **10**, 9697 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66514-8>]