

## 플렉서블 기판 전/후면에서의 레이저를 이용한 ITO/Ag/ITO 전극층의 식각 특성

남한엽, 권상직, 조의식<sup>a</sup>

가천대학교 전자공학과

### Laser Etching Characteristics of ITO/Ag/ITO Conductive Films on Forward/Reverse Sides of Flexible Substrates

Hanyeob Nam, Sang Jik Kwon, and Eou-Sik Cho<sup>a</sup>

Department of Electronic Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

(Received July 8, 2016; Revised July 19, 2016; Accepted July 20, 2016)

**Abstract:** ITO/Ag/ITO conductive films on PET (polyethylene terephthalate) was etched by a Q-switched diode-pumped neodymium-doped yttrium vanadate (Nd:YVO<sub>4</sub>,  $\lambda = 1064$  nm) laser. During the laser direct etching, the laser beam was incident on the two different directions of PET and the etching patterns were investigated and analyzed. At a lower repetition rate of laser pulse, the larger laser etched patterns were obtained by laser beam incident on reverse side of PET substrate. On the contrary, at a higher repetition rate, it was possible to find the larger etched patterns in case of the laser beam incidence on forward side of PET substrate. For the laser beam incidence on reverse side, the laser beam is expected to be transferred and scattered through the PET substrate and the laser beam energy is thought to be dependent on the etch laser pulse beam energy.

**Keywords:** ITO/Ag/ITO, PET, Laser etching, Forward/reverse side, Repetition rate, Laser pulse energy

#### 1. 서론

높은 투과도 및 고전도성의 특성을 가지고 있는 인듐 주석 산화물(indium tin oxide, ITO) 박막은 오늘날까지 디스플레이 패널, 터치패널 등의 센서, 박막형 태양전지 등의 용도에 대표적인 투명 전극 재료로 많이 사용되어 왔다 [1-5]. 그러나, 많은 장점들에도 불구하고 금속에 비하면 상대적으로 높은 저항 및 주원료인 인듐의 수급 문제 등으로 인하여 최근에는 산화

아연 혹은 타 투명 전도막으로의 대체가 활발히 연구 개발되고 있다. ITO 박막 사이 얇은 은(Ag) 전극을 삽입하는 ITO/Ag/ITO 박막 구조의 경우, 삽입된 Ag 층의 높은 전도성으로 인하여 ITO 박막에 비하여 매우 낮은 저항을 유지할 수 있으며, 투과율이 비교적 가시광선 보다 높은 적외선 영역에서 떨어지기 시작하므로 최근에 여러 그룹에서 활발히 연구되고 있다 [6-9]. 특히 최근 가장 많이 사용되는 플렉서블 기판인 폴리테탈렌 테페르탈레이트(polyethylene terephthalate, PET) 위에 ITO/Ag/ITO 박막을 형성할 경우, 투명하면서도 고전도성을 유지할 수 있는 접을 수 있는 차세대 디스플레이, 글라스에 비하여 가벼운 터치패널, 직렬 저항으로 인한 손실 없이 대형 글라스 제작 없이도 넓은 면적 구현이 가능한 태양전지 등의 전자소자 구

a. Corresponding author; [es.cho@gachon.ac.kr](mailto:es.cho@gachon.ac.kr)

현이 가능하다는 장점이 있다.

ITO/Ag/ITO 박막의 전자소자에의 응용을 위해서는, 원활한 패터닝 공정이 필수적인데, PET 기판상에서는 기존의 사진식각 공정에 의한 패터닝 구현이 노광 후 현상, 습식 식각 및 감광막의 스트립 공정 등으로 인하여 매우 어려운 편이다. 이에 레이저를 이용하여 글라스 상에서 ITO/Ag/ITO 박막을 직접 패터닝하는 연구가 발표되었고, 몇몇 기관에서 레이저를 이용한 패터닝을 계속 시도하고 있다 [10]. 또한, 레이저 식각시 발생하는 열로 인하여 박막상의 damage가 발생하는 경우를 방지하고, flat한 식각 단면을 구현하기 위해서 실제 박막 위로 레이저 빔을 조사하는 대신 박막이 증착된 기판의 후면으로부터 레이저 빔을 조사하는 공정도 다수의 연구가 진행되고 있다 [11-13].

본 연구에서는 PET 기판상에 스퍼터링으로 증착된 ITO/Ag/ITO 박막을 레이저로 직접 식각하였으며, 식각시 레이저 빔의 방향을 크게 두 방향으로 나누어 식각 특성을 비교 관찰하였다. PET 기판상의 박막에 직접 레이저 빔이 조사된 정면 또한 PET 기판 후면으로 레이저 빔이 조사된 후면의 두 가지 경우에 대해 레이저 반복율 및 레이저 빔 스캔 속도를 변화시켜 가면서, 식각 특성에 레이저 빔의 방향이 미치는 영향 및 그 메커니즘에 대해 연구 및 분석하였다.

## 2. 실험 방법

약 200  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 PET 기판상에 스퍼터링 공정을 이용하여 ITO 및 Ag 박막을 각각 DC power 및 RF power를 사용하여 상온에서 증착하였다. 상부 및 하부 ITO 박막 스퍼터링시 DC power는 2 kW로 고정되었고, 아르곤과 산소량은 각각 50 sccm, 1.2 sccm으로 고정되었다. Ag 박막 스퍼터링시 RF power는 약 30 W로 고정되었으며, 아르곤 15 sccm의 분위기에서 약 75초 동안 증착되었다. 상/하부 ITO 박막의 각각의 두께는 대략 53.5 nm, Ag 박막의 두께는 대략 15.3 nm로 측정되었다.

Nd:YVO<sub>4</sub> (neodymium-doped yttrium vanadate) 매질을 다이오드 펌핑, Q-switch를 이용하여 1,064 nm 파장의 레이저 빔을 출력하는 미야찌사의 ML-7111A 레이저를 증착된 박막에 적용, 패터닝을 수행하였다. 레이저 빔의 조사 방향은 박막이 증착된 PET 기판의 정면 및 기판의 후면 두 방향으로 진행하였고, 이때 레이저 빔의 펄스의 반복율을 20 kHz 부터 80 kHz 까지

변화시키면서 개별 펄스의 에너지 변화에 따른 식각 특성을 확인하였다. 또한 레이저 빔의 스캔 속도를 500 mm/s, 1,000 mm/s, 2,000 mm/s로 변화시키면서 빔의 중첩 정도에 따른 특성 또한 비교 분석하였다.

그림 1은 ITO/Ag/ITO 박막이 증착된 PET 기판 전/후면에 적용된 레이저 직접 식각 공정을 보여주고 있다. 레이저 빔 반복율에 따른 개별 펄스 에너지의 크기의 비교 확인이 가능하다.

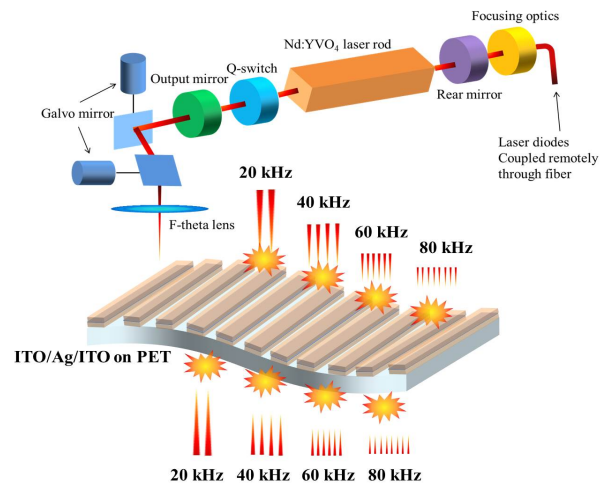


Fig. 1. Schematic of the laser etching on ITO/Ag/ITO films on the forward/reverse sides of PET substrates.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2는 PET 위에 스퍼터링된 ITO/Ag/ITO 박막 및 Ag 단일막의 파장에 따른 투과율을 보여준다. 15 nm 두께의 Ag 단일막과 ITO/Ag/ITO 박막의 면저항은 각각 3.07 ohm/sq 및 3.39 ohm/sq으로 측정되었고, ITO 박막이 추가되었음에도 면저항 값이 조금 떨어지게 측정된 이유는 상온 증착으로 인한 상하부 ITO 박막과 Ag 박막 사이 계면 효과로 인한 저항이 형성되었기 때문으로 여겨진다.

그림 3(a)와 (b)는 각각 Ag 단일막과 ITO/Ag/ITO 박막의 등가 면저항 구조를 보여주고 있으며, 3(b)에서 ITO와 Ag 박막 사이 계면저항 R<sub>i</sub>를 가질 경우 실제 구현되는 등가저항이 계면저항이 없을 경우보다 더 크게 측정될 수 있으며, 궁극적으로는 3(a)의 Ag 단일막보다 더 높은 저항을 가질 수 있음을 보여준다. 400~800 nm의 가시광선 영역에서의 평균 투과율은 Ag

단일막과 ITO/Ag/ITO 박막의 경우 각각 35.6%, 46.6%로 측정되었다. 이는 ITO-Ag-ITO 박막의 투과율 그래프가 Ag 단일막과 비교시 약 500 nm 이상의 조금 더 높은 파장대에서 상대적으로 높은 투과율을 보이는 것과 관련 있는 것으로 보인다.

그림 4는 레이저 빔 스캔 속도가 500 mm/s일 때 PET 기판상의 ITO/Ag/ITO 박막에 형성된 레이저 식각 패턴의 전자 현미경 사진을 보여주고 있다. 그림 4(a)와 (b)는 레이저 빔의 반복율이 20 kHz일 때 레이저 빔이 각각 기판의 정면 및 후면으로 조사되었을 때의 식각 패턴이며 각각 103 μm 및 112 μm의 식각 패턴 폭을 확인할 수 있었다. 그림 4(c)와 (d)는 레이저 빔의 반복율이 80 kHz일 때의 기판의 정면 및 후면으로의 레이저 빔 조사 패턴이며 둘 다 91 μm의 동일한 레이저 식각 폭을 확인할 수 있었다.

그림 5(a)와 (b)는 그림 4(a) 및 (b)에서 레이저 빔 스캔 속도만 2,000 mm/s로 증가하였을 때 결과로, 빔의 스캔 속도 증가시 레이저 빔의 중첩 정도가 작아짐으로 인하여 라인 형태가 아닌 spot 모양의 식각 패턴을 확인할 수 있었다 [14,15]. 레이저 빔이 기판의 후면에 조사된 그림 5(b)의 경우 정면에 조사된 5(a)보다 더 넓은 식각 패턴 사이즈를 가짐으로써 spot이 중첩됨이 확인 되었고, 이는 그림 4(a)와 (b)에서의 결과와 일치함을 확인할 수 있었다.

반면에 레이저 빔의 반복율이 80kHz 일 때의 그림 5(c)와 (d)의 식각 패턴 폭은 각각 87 μm 및 82 μm의 값을 얻을 수 있었고, 이는 그림 4(a)와 (b), 5(a)와 (b)의 낮은 레이저 빔 반복율의 경우와는 반대의 경향을 확인할 수 있었다.

이의 원인은 레이저 빔의 에너지가 가우시안 분포 형태를 가지는 것과 연관되어 있다고 볼 수 있다. 그림 1에서와 같이 각각의 개별 레이저 펄스 에너지가 큰 낮은 약 20kHz의 레이저 빔 반복율의 경우에는 레이저 빔이 PET 기판의 후면에 조사되어 기판을 거친 후에 레이저 빔이 보다 넓게 분산되더라도 ITO/Ag/ITO 박막의 Ag를 식각할 수 있는 문턱 에너지값 이상을 확보할 수 있으므로, 후면 식각시 보다 넓은 식각 패턴을 얻을 수 있다고 결론 지을 수 있다. 반면에 개별 레이저 펄스 에너지가 상대적으로 작은 높은 레이저 빔 반복율의 경우에는 레이저 빔의 후면 조사시 분산된 에너지가 더욱 작아짐으로써 박막을 식각할 수 있는 문턱 에너지 값을 확보할 수 없으므로 인하여 후면 조사시 오히려 전면 조사의 경우보다 더 작은 식각 패턴 폭을 얻을 수 있다고 볼 수 있다.

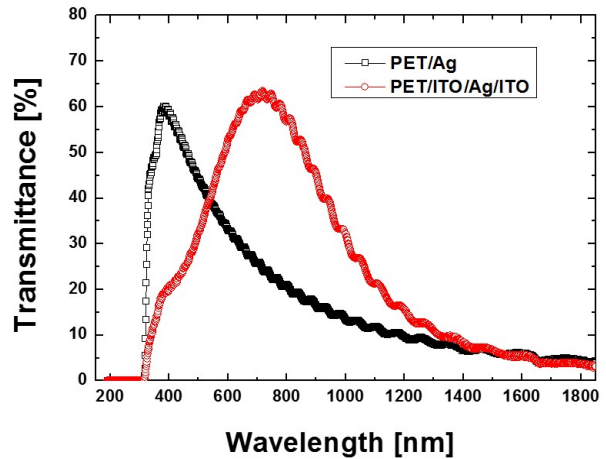


Fig. 2. Transmittance of PET/ITO/Ag/ITO films and PET/Ag films.

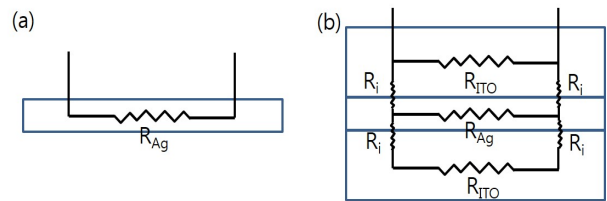


Fig. 3. Schematic of the equivalent sheet resistance of (a) Ag and (b) ITO/Ag/ITO considering the interfacial resistance between ITO and Ag.

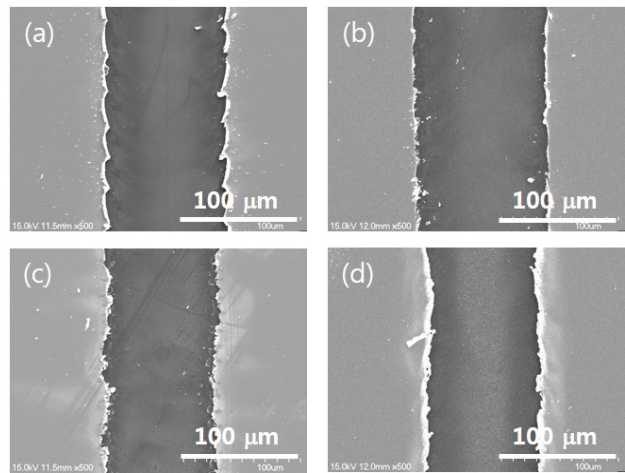
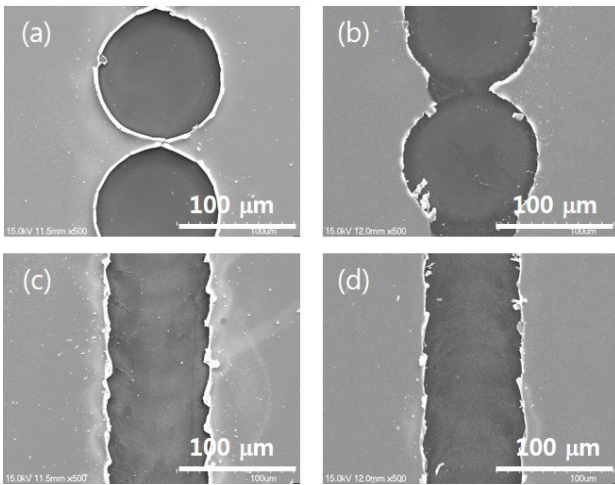


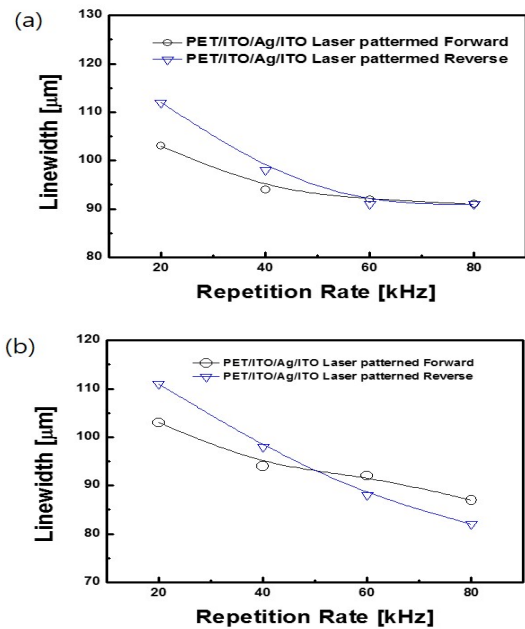
Fig. 4. SEM images of etching patterns on ITO/Ag/ITO films on PET laser-ablated with a scanning speed of 500 mm/s. The repetition rate and the direction of laser ablation was (a) 20 kHz and forward, (b) 20 kHz and reverse, (c) 80 kHz and forward, and (d) 80 kHz and reverse, respectively.



**Fig. 5.** SEM images of etching patterns on ITO/Ag/ITO films on PET laser-ablated with a scanning speed of 2000 mm/s. The repetition rate and the direction of laser ablation was (a) 20 kHz and forward, (b) 20 kHz and reverse, (c) 80 kHz and forward, and (d) 80 kHz and reverse, respectively.

이는 그림 4의 500 mm/s의 낮은 레이저 빔 스캔 속도에서는 레이저 빔의 중첩으로 인하여 전면과 후면에서의 식각 패턴의 차이가 그나마 없지만, 그림 5의 2,000 mm/s의 높은 레이저 빔 스캔 속도의 경우 레이저 빔의 중첩이 상대적으로 적은 경우는 후면 조사시보다 작은 식각 패턴을 얻을 수 있다고 결론내릴 수 있다.

그림 6(a)와 (b)는 그림 4와 5에서의 전자 현미경 패턴 결과를 포함한 레이저 빔 스캔 속도가 각각 500 mm/s와 2,000 mm/s일 때의 기판 전/후면에서의 레이저 빔 조사시 ITO/Ag/ITO 박막위에서의 레이저 식각 패턴 폭의 결과를 레이저 빔 반복율의 함수로 보여주고 있다. 그림 4와 5에서 분석한 바와 같이, 낮은 빔 반복율의 경우 보다 큰 개별 레이저 빔 펄스 에너지로 인하여 레이저 빔의 기판 후면 조사시 전면 조사의 경우보다 더 넓은 식각 패턴 폭을 얻을 수 있으며, 빔의 반복율이 커질수록 상대적으로 개별 레이저 빔 펄스 에너지가 작아지고, 이로 인하여 후면 조사시 레이저 빔의 분산으로 인한 보다 넓은 부분에서의 식각 효과보다는 레이저 빔의 기판 통과시 빔의 분산에 의한 에너지 감소 효과가 더 커진다고 설명할 수 있다. 또한 후면 조사시의 에너지 감소 효과는 그림 6(b)와 같이 상대적으로 낮은 중첩 정도를 높은 레이저 빔 스캔 속도의 경우에도 더 뚜렷하게 확인할 수 있다.



**Fig. 6.** Etching line widths on ITO/Ag/ITO films laser-ablated at the forward/reverse side of PET substrate as a function of repetition rate with a scanning speed of (a) 500 mm/s and (b) 2,000 mm/s.

#### 4. 결론

PET 기판상에 스퍼터링으로 증착된 ITO/Ag/ITO 박막을 1,064 nm 파장을 가지는 Nd:YVO<sub>4</sub> 레이저를 이용하여 직접 식각하였고, 레이저 빔의 조사 방향에 따른 식각 특성의 차이를 연구하였다. 레이저 빔의 반복율에 따른 특성을 비교 분석한 결과, 낮은 반복율에서는 상대적으로 높은 레이저 펄스 에너지로 인하여 기판 후면 식각시 기판을 통과한 레이저 빔이 넓게 퍼져서 오히려 더 넓은 식각 패턴을 구현할 수 있었으며, 이와는 대조적으로 높은 반복율에서는 개별 레이저 펄스 에너지의 감소로 인하여 후면 식각시 식각 패턴의 차이가 없거나 오히려 더 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 산업전문인력역량강화사업(N0001415, 디스플레이 장비부품 전문인력양성사업)으로 지원되었습니다.

## REFERENCES

- [1] H. Liu and R. Sun, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 063304-1 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2844854>]
- [2] J. Zhang, W. Que, P. Zhong, and G. Zhu, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **10**, 7473 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2010.2875>]
- [3] J. Kim, N. H. Kim, H. Kim, D. Jung, and H. Chae, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **11**, 6490 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2011.4507>]
- [4] M.A.M. Carthy, B. Liu, E. P. Donoghue, I. Kravchenko, D. Y. Kim, F. So, and A. G. Rinzler, *Science*, **332**, 570 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1203052>]
- [5] M. H. Ahn, E. S. Cho, and S. J. Kwon, *Vacuum*, **101**, 221 (2014). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.08.018>]
- [6] K. H. Choi, J. Y. Kim, Y. S. Lee, and H. J. Kim, *Thin Solid Films*, **341**, 258 (1999). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01556-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01556-9)]
- [7] J. A. Jeong and H. K. Kim, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 1081 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2009.06.014>]
- [8] C. Guillén and J. Herrero, *Optics Communications*, **282**, 574 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2008.10.075>]
- [9] N. Meshram, C. Loka, K. R. Park, and K. S. Lee, *Mater. Lett.*, **145**, 120 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2015.01.101>]
- [10] H. J. Kim, K. W. Seo, Y. H. Kim, J. Choi, and H. K. Kim, *Appl. Surf. Sci.*, **328**, 215 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.12.017>]
- [11] S. Beyer, V. Tornari, and D. Gornickj, *Proc. SPIE*, **5063**, 202 (Munich, Germany, 2003). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.540498>]
- [12] G. T. Oh, S. J. Kwon, J. H. Han, and E. S. Cho, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **15**, 2413 (2015). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2015.10249>]
- [13] P. Liu, W. Wang, X. Mei, B. Liu, and W. Zhao, *Opt. Laser Eng.*, **69**, 35 (2015).
- [14] S. F. Tseng, W. T. Hsiao, K. C. Huang, and D. Chiang, *Appl. Surf. Sci.*, **257**, 8813 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.04.055>]
- [15] J. X. Wang, S. J. Kwon, J. H. Han, and E. S. Cho, *J. Nanosci. Nanotech.*, **13**, 7751 (2013). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2013.7817>]