

## 펄초 레이저를 이용한 플렉시블 ITO 패터닝 연구

손익부, 김영섭, 노영철

광주과학기술원 고등광기술연구소 미세광학연구실

### Femtosecond laser patterning of ITO film on flexible substrate

Ik-Bu Sohn, Youngseop Kim, Young-Chul Noh

Advanced Photonics Research Institute, GIST

#### Abstract

Indium tin oxide (ITO) provides high electrical conductivity and transparency in the visible and near IR (infrared) wavelengths. Thus, it is widely used as a transparent electrode for the fabrication of liquid crystal displays (LCDs) and organic light emitting diode displays (OLEDs), photovoltaic devices, and other optical applications. Lasers have been used for removing coating on polymer substrate for flexible display and electronic industry. In selective removal of ITO layer, laser wavelength, pulse energy, scan speed, and the repetition rate of pulses determine conditions, which are efficient for removal of ITO coating without affecting properties of the polymer substrate. ITO coating removal with a laser is more environmentally friendly than other conventional etching methods. In this paper, patterning of ITO film from polymer substrates is described. The Yb:KGW femtosecond laser processing system with a pulse duration of 250fs, a wavelength of 1030nm and a repetition rate of 100kHz was used for removing ITO coating in air. We can remove the ITO coating using a scanner system with various pulse energies and scan speeds. We observed that the amount of debris is minimal through an optical and a confocal microscope, and femtosecond laser pulses with 1030nm wavelength are effective to remove ITO coating without the polymer substrate ablation.

**Key words:** Femtosecond laser, Laser patterning, Flexible display, Indium-tin oxide (ITO), Thin film

#### 1. 서 론

기존에는 유리 기판을 기초로 한 LCD, PDP, OLED와 같은 디스플레이 개발이 왕성했지만, 최근에는 구부릴 수 있는 플렉시블 디스플레이 개발이 활발해지고 있다. 플렉시블 디스플레이의 특징은 구부리는 것이 가능하다는 점뿐만 아니라, 높은 생산성을 기대할 수 있다는 점이다. 플렉시블 디스플레이는 기존에는 유리 기판을 사용했지만, 필름 기판을 사용함으로써 생산 과정에서 인쇄법을 채택하게 됐고, 궁극적으로는 roll-to-roll이 가능해져, 극적으로 생산 비용을 낮출 수 있는 가능성이 있다.

전 세계적으로 대표적인 기업체들에 의해서 플렉시블 유기EL, 플렉시블 액정, 전자 종이 등의 개발이 활발히 진행되고 있는 상황이다. Fig. 1은

소니에서 개발한 플렉시블 OLED 스크린의 이미지이다. 소니의 2.5인치 OLED 스크린은 일상생활에서 구부릴 수 있도록 0.3mm의 매우 얇은 두께를 가지고 있다. 이 스크린의 해상도는 120 × 169이며 무게는 1.5g이다. 앞으로 이러한 플렉시블 디스플레이 기술은 더 크고, 우수하고, 얇게 발전할 것으로 예상된다. 그러나 아직까지 확실히 기존의 디스플레이에서는 찾아볼 수 없는, 휘거나 잘 깨지지 않는 것, 저소비 전력 등의 디바이스라는 점에서는 장점이 있으며, 머지않아 종이처럼 간편하게 접을 수 있는 본격적인 전자 종이와 적당한 가격에 시장에 투입된다면 진정한 의미의 전자 서적 시장이 성립될 것으로 기대된다.

ITO 필름은 높은 전도성과 가시광이나 적외선 영역에서 매우 우수한 투명도를 가지고 있다. 그

래서 LCD, OLED, 광전지 소자 및 다양한 광산업 분야에 투명 전극으로써 폭넓게 활용되고 있다.<sup>1,2</sup> 디스플레이와 전자 산업에 유리를 기판으로 하는 ITO 필름 가공을 위하여 다양한 기술들이 연구되고 있다. 레이저를 이용한 기존의 유리 기판 위의 ITO 필름 패터닝은 엑시머 레이저, UV 나노초 레이저, 피코초 레이저와 펨토초 레이저를 이용한 연구가 진행되어 왔으며 산업 현장에서도 폭 넓게 활용이 되고 있다.<sup>3-5</sup> 최근에는 플렉시블 디스플레이를 위한 플라스틱 기판의 ITO 필름 가공에 대한 관심이 집중되고 있다. 그러나 플렉시블 디스플레이를 위하여 플라스틱 기판을 사용하게 됨으로써 ITO 필름만 깨끗하게 패터닝 하는 것이 중요한 문제로 대두되고 있다.

본 연구에서는 플라스틱 기판 위의 ITO 필름을 레이저를 이용하여 효율적으로 패터닝하는 것에 대한 연구를 소개하고자 한다. 플라스틱 기판에 손상을 주지 않고 깨끗한 가공을 하기 위해서 IR 영역의 펨토초 레이저를 사용하였다. 또한 100kHz의 높은 반복률을 가지기 때문에 고속으로 패터닝이 가능하다는 장점이 있다. 이번 실험에는 파장 1030nm, 펄스폭 250fs, 반복률 100kHz, 최대 출력 6W를 가지는 펨토초 레이저의 펄스 에너지와 스캔 속도를 조절하여 플렉시블 ITO 필름의 가공 특성을 실험적으로 연구하였다.

## 2. 실험 및 결과

펨토초 레이저를 이용한 레이저 가공에서 가장 큰 특징은 레이저와 재료의 상호반응 시 발생하는 열이 전파되는 시간을 갖지 못하기 때문에 재료의 열적손상이나 구조변화를 발생시키지 않는 것이다. 다시 말해, 재료의 국부적인 부분이 극도의 짧은 시간 내에 제거되어 일반적인 레이저 가공에서 나타나는 열확산 현상은 발생되지 않으며 기존 레이저의 열적(thermal) 가공보다 정밀한 가공이 가능하다. 또한, 펨토초 레이저는 가공물의 주변에 형성되던 용융물(melt) 및 잔유물(debris)의 발생도 대부분 억제할 수 있고 발생된다 하더라도 매우 미세한 파우더 형태이며 이는 쉽게 세척(cleaning)이 가능하다는 장점이 있어 현재 전 세계적으로 각광을 받고 있다.<sup>6,8</sup>

펨토초 레이저를 이용한 정밀 미세 패턴 가공은 최근에 각광받고 있는 LCD와 PDP 같은 디스플레이 분야에 활용이 가능하다. 국내 LCD 업체

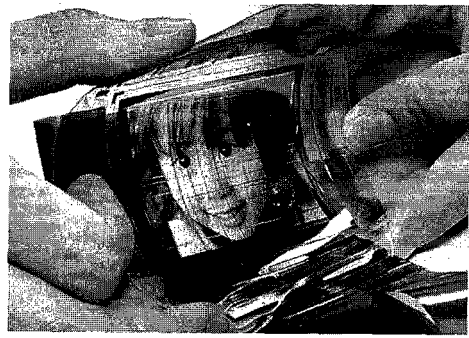


Fig. 1 Flexible OLED screen image.

들이 LCD TV 시대를 앞당기고 타 디스플레이와의 경쟁 우위를 위해 최근 혁신적인 새로운 공정 기술 개발에 착수하면서 장비·재료 분야의 일대 혁명적인 변화가 초래될 전망이다. LCD 장비·재료 분야의 혁명적인 변화는 새로운 공정 개발로 비용을 최소화하는 것이 핵심이다. 그 중에서 매트릭스 구동 디스플레이에 사용되는 투명전극의 재료인 ITO(Indium-Tin Oxide) 패터닝에 대한 레이저 가공이 최근에 많은 관심을 끌고 있다.

매트릭스 구동방식은 PDP, LCD 등의 얇고 평평한 디스플레이에 사용되며, 기본적으로 다수의 가로 전극과 다수의 세로 전극을 모기장처럼 배치하고 가로 몇 번째 세로 몇 번째 전극에 신호를 주어 그 위치의 셀이 발광하도록 하는 원리인데, 이 전극들이 불투명하면 전극 사이에서 발생하는 빛이 전극에 가려서 외부에서 잘 안 보이게 되기 때문에 투명한 전극이 필요한 것이다. 지금까지 개발된 재료 중에는 ITO가 가장 투명하면서 전기도 잘 통하고 생산성도 좋기 때문에 이것을 투명전극의 재료로 사용한다.

기존의 유리기판 위의 ITO는 기판 재료인 유리에 비해서 임계값(threshold)이 낮아서 레이저를 사용하여 유리에 손상을 주지 않고서 매우 정밀한 가공을 할 수 있다. 그러나 기존의 펨토초 레이저는 정밀한 가공이 가능하지만 가공 속도가 느리다는 문제점을 가지고 있다. 산업체 적용을 위해서는 고속 가공이 가능한 고반복률 펨토초 레이저가 필요하다. 또한, 플라스틱 기판 위의 플렉시블 ITO 필름 패터닝에서는 UV 영역에서 흡수도가 높은 플라스틱 기판에 손상을 주지 않기 위해서는 IR 영역의 파장이 유리하다.

본 연구에서는 고속 고정밀 ITO 필름 패터닝을 위하여 1030nm의 파장과 100kHz의 반복률을 가지는 펨토초 레이저를 사용하였다. Fig. 2는

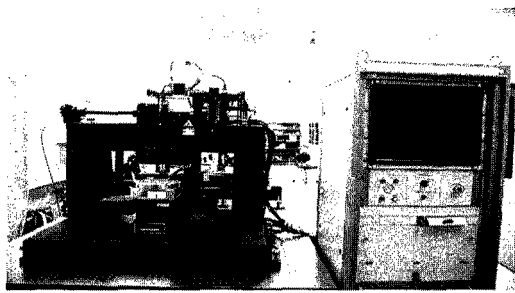
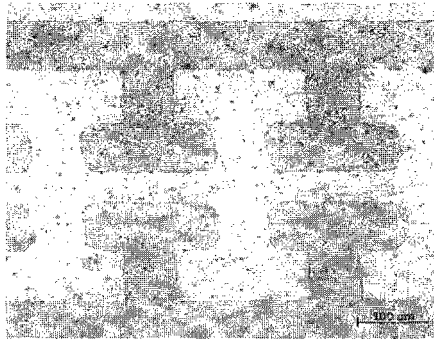


Fig. 2 High repetition rate femtosecond laser processing system.



(a)



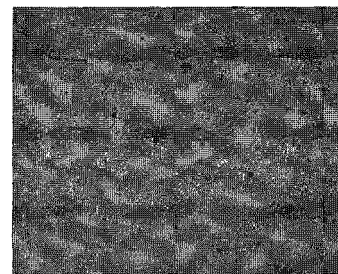
(b)

Fig. 3 Optical and confocal microscopy image of ITO film patterned by femtosecond laser (1m/s scan speed, 2.33μJ pulse energy).

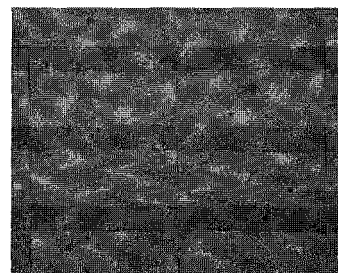
고등광기술연구소에서 보유하고 있는 실험에 사용된 Yb:KGW diode-pumped femtosecond laser system(Pharos, Light Conversion)이다. 레이저 사양은 펄스폭이 250fs이고 regeneration amplifier에서 방출된 레이저 빔 profile은 Gaussian 형태를 가지며 출력빔은 선편광을 가진다. 평균 출력 에너지는 6W이고, 샘플 표면에서의 레이저 강도를 조절하기 위해 Neutral density filter를 사용하였다. 정밀 가공에 적합한 스테이지 가공 시스템과 고속 가공에 유리한 스캐너 가공 시스템을 모두 갖추고 있다. 본 연구에서는 고속 가공을 위하여

스캐너 가공 시스템 이용하였다. 실험에 사용된 샘플은 PET 플라스틱 기판 위에 ITO가 200nm 정도의 두께로 코팅되어 있다.

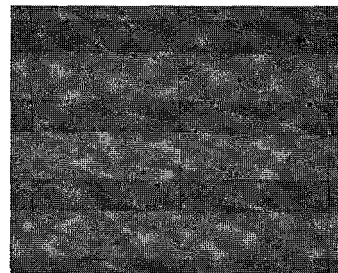
Fig. 3은 1030nm 파장과 100kHz 반복률을 가지는 펄스초 레이저로 주기적인 패턴을 가공한 ITO 필름의 광학 및 공초점 현미경 측정 사진이다. 실험에 사용된 스캐너 렌즈의 초점거리는 100mm, spot size는 약 28μm, 스캔속도는 1m/s, 펄스 에너지는 2.33μJ가 사용되었다. IR 영역의 파장을 사용함으로써 플라스틱 기판에는 손상이 없이 ITO 필름만을 제거할 수가 있다. 펄스초 레이저 펄스는 열영향에 의한 가공 주변부의 Burr가 없이 깨끗하고 정밀한 가공이 가능하다. 또한 초당 1000개 이상 조사되는 펄스에 의해서 기존의 낮은 가공 속도가 문제가 되던 수 kHz의 반복률을 가지는 펄스초 레이저 가공 시스템에 비해 1m/s 이상의 높은 스캔 속도를 얻을 수 있다. 이와 같이 1030nm 고반복률 펄스초 레이저를 이용하여 고속 고정밀 플렉시블 ITO 패터닝이 가능하다.



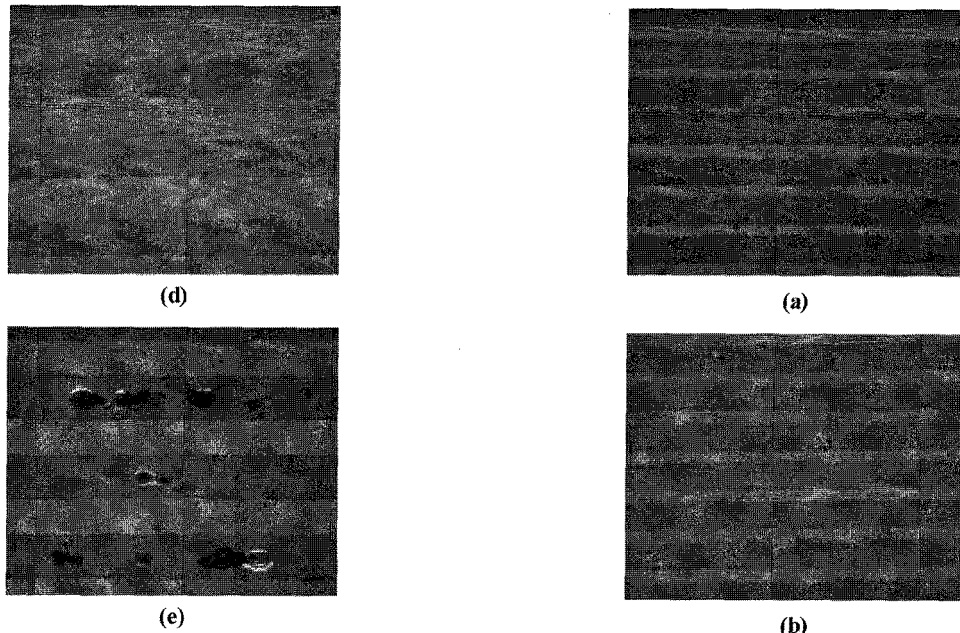
(a)



(b)



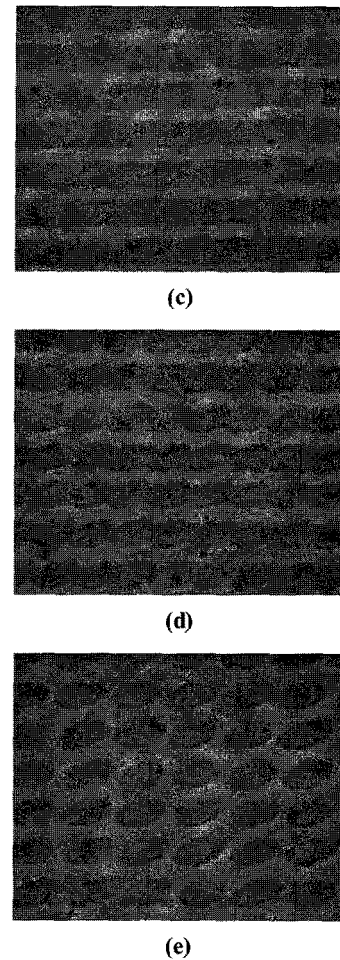
(c)



**Fig. 4** Optical microscopy image of ITO film patterned by femtosecond laser with different pulse energy. (a) 2.35 $\mu$ J, (b) 4.26 $\mu$ J, (c) 7.81 $\mu$ J, (d) 10.7 $\mu$ J, and (e) 20.5  $\mu$ J at 2m/s scan speed.

Fig. 4는 다양한 펄스 에너지에서 가공한 ITO 필름의 현미경 측정 결과이다. 줄 간격은 50 $\mu$ m로 ITO 패터닝을 하였으며 스캔 속도는 2m/s로 고정 하였다. Fig. 4(a)에서와 같이 ITO 필름의 임계값은 2.35 $\mu$ J이며, 플라스틱 기판의 임계값은 Fig. 4(e)에서와 같이 20.5 $\mu$ J이다. Fig. 4(b),(c),(d)에서와 같이 펄스 에너지가 4.26 $\mu$ J, 7.81 $\mu$ J, 10.7 $\mu$ J에서 각각 16 $\mu$ m, 20 $\mu$ m, 23 $\mu$ m의 선폭을 얻었다. 2m/s 스캔 속도에서 펄스 에너지가 20.5 $\mu$ J이상이 되면 플라스틱 기판이 가공이 되는 것을 Fig. 4(e)에서 볼 수 있다. 이와 같이 펄스 에너지가 ITO 필름의 임계값 2.35 $\mu$ J와 플라스틱 기판의 임계값 20.5 $\mu$ J 사이에서 원하는 선폭의 ITO 필름 패터닝이 가능하다.

Fig. 5는 다양한 스캔 속도에서 가공한 ITO 필름의 현미경 측정 결과이다. 줄 간격은 50 $\mu$ m로 ITO 패터닝을 하였으며 펄스 에너지는 5.1 $\mu$ J로 고정 하였다. Fig. 5(a),(b),(c)에서와 같이 스캔 속도가 1m/s, 2m/s, 3m/s에서 각각 16 $\mu$ m, 20 $\mu$ m, 23 $\mu$ m의 선폭을 얻었다. 펄스 에너지는 5.1 $\mu$ J에서 ITO 필름 패터닝을 하는데 있어 스캔 속도가 5m/s가 되면 펄스 중첩은 90% 정도가 되며, 스캔 속도가 7m/s 이상이 되면 펄스가 중첩이 되지 않는 것을 각각 Fig. 5(d),(e)에서 볼 수 있다.



**Fig. 5** Optical microscopy image of ITO film patterned by femtosecond laser with different scan speed. (a) 1m/s, (b) 2m/s, (c) 3m/s, (d) 5m/s, and (e) 7m/s at 5.1 $\mu$ J pulse energy.

### 3. 결론

본 연구에서는 플라스틱 기판 위의 ITO 필름을 1030nm 고반복률 펄스 레이저를 이용하여 효율적으로 패터닝 하는 기술에 대한 연구를 소개하였다. 플라스틱 물질에 흡수도가 낮은 IR 영역대의 파장을 사용함으로써 ITO 필름 기판인 PET에 손상을 주지 않고 깨끗한 가공을 할 수 있으며, 100kHz의 높은 반복률을 가지기 때문에 수 m/s의 고속 패터닝이 가능하다는 장점이 있다. 2m/s의 스캔 속도에서 다양한 펄스 에너지에 따른 가공 실험을 하였으며, 이때의 ITO 필름의 임계값은 2.35 $\mu$ J이고 플라스틱 기판의 임계값은 20.5 $\mu$ J임을 확인하였다. 또한 5.1 $\mu$ J 펄스 에너지에서 스캔 속도에서 따른 ITO 필름 가공 실험을 하였으며, 스캔 속도 5m/s의 고속 ITO 필름 패터닝이 가능하였다. 이와 같이 1030nm 고반복률 펄스 레이저를 이용한 플렉시블 ITO 필름 패터닝 기술은 플라스틱 기판에 손상이 없이 5m/s 이상의 고속 고정밀 패터닝이 가능하여 실제 산업체 적용 가능성이 매우 높음을 확인하였다.

### 참고문헌

- 1) P. C. Kao, S. Y. Chu, C. Y. Zhan, L. C. Hsu, W. C. Liao, "Fabrication of the patterned flexible OLEDs using a combined roller imprinting and photolithography method," Proceedings of IEEE Conference on Nanotechnology, July 2005.
- 2) B. J. Luff, J. S. Wilkinson, and G. Perrone, "Indium tin oxide overlayered waveguides for sensor applications," Applied Optics, Vol. 36, pp. 7066-7072, 1997.
- 3) C. Molpeceres, S. Lauzurica, J. L. Ocana, J. J. Gandia, L. Urbina and J. Carabe, "Microprocessing of ITO and a-Si thin films using ns laser sources," J. Micromech. Microeng. Vol. 15, pp. 1271-1278, 2005.
- 4) G. Raciukaitis, M. Brikas, M. Gedvilas, T. Rakickas, "Patterning of indium-tin oxide on glass with picosecond lasers," Applied Surface Science, Vol. 253, pp. 6570-6574, 2007.
- 5) H. W. Choi, D. F. Farson, J. Bovatsek, A. Arai,

- and D. Ashkenasi, "Direct-write patterning of indium-tin-oxide film by high pulse repetition frequency femtosecond laser ablation," Applied Optics, vol.46, pp. 5792-5799, 2007.
- 6) 손익부, 이만섭, 이상만, 우정식, 정정용, "펄스 레이저를 이용한 미세 패터닝 기술", Korean Society of Laser Processing, 8(1), pp. 39-44, 2005.
- 7) C. Florea, "Fabrication and characterization of photonic devices directly written in glass using femtosecond laser pulses," J. Lightwave Technol., Vol. 21, pp. 246-253, 2003.
- 8) I. B. Sohn, M. S. Lee, J. Y. Chung, "Fabrication of optical splitter and passive alignment technique with a femtosecond laser," IEEE Photonic Technol. Lett., Vol. 17, No. 11, pp. 2349-2351, 2005.