

빔 셰이핑된 펨토초 레이저를 이용한 터치스크린 패널의 ITO 박막 패터닝

김명주*, 김용현**, 윤지욱*⁺, 최원석*, 조성학*⁺, 최지연**^{+,✉}

*한국기계연구원 나노공정연구실, **한국기계연구원 광응용기계연구실

⁺과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스전공

Patterning of ITO on Touch Screen Panels using a beam shaped femtosecond laser

Myung-Ju Kim*, Yong-Hyun Kim**, Ji-Wook Yoon*⁺, Won-Seok Choi*, Sung-Hak Cho*⁺, Jiyeon Choi**^{+,✉}

*Nano Machining Laboratory, KIMM (Korea Institute of Machinery and Materials)

**Dept. of laser and ebeam application, KIMM (Korea Institute of Machinery and Materials)

⁺Dept. of Nanomechatronics, University of Science and Technology

Abstract

Femtosecond laser patterning of ITO on a touch screen panel with a shaped fs laser beam was investigated. A quasi flat-top beam was formed using a variable mask and a planoconvex lens. The spatial profile of the original Gaussian beam and the shaped beam were monitored by a CCD beam profiler. The laser patterned ITO film was examined using an optical microscope, Scanning Electron Microscope (SEM) with Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS), and Atomic Force Microscope (AFM). It turned out that the quality of the ITO pattern fabricated by a shaped beam is superior to that of the pattern without beam shaping in terms of debris generation, height of the craters, and homogeneity of the bottom. Optimum processing window was determined at the laser irradiance exhibiting 100% removal of Sn. The removal rate of In was measured to be 83%.

Keywords: Laser patterning(레이저 패터닝), Ablation(어블레이션), Beam shaping(빔 셰이핑), Indium Tin Oxide film(ITO 박막), Touch screen panel(터치스크린 패널)

1. 서론

최근 모바일 기기 제조기술의 비약적인 발전과 고속 정보통신 기간망의 확대에 의해 고화질 동영상 등 고용량 데이터를 실시간으로 전송할 수 있게 되었다. 정보의 양과 질이 모두 중요해짐에 따라 빠른 정보 검색 및 높은 확장성 등 사용자 편의를 위한 터치스크린 기능은 모바일 기기에 있어서 필수적인 요소로 자리매김 하고 있다. 현재 모바일 정보 기기의 의존도가 높아지는 추세에 있으므로 터치스크린의 성장 잠재력은 더욱 높아질 전망이다. 점차 그 적용 범위가 확대될 것으로 예상된다.¹

터치스크린을 제조하는데 있어 핵심이 되는 소재가 바로 ITO(Indium Tin Oxide) 박막이다. ITO는

산화인듐(In_2O_3)과 산화주석(SnO_2)이 약 90-95 : 5-10% 비율로 구성된 산화물로서 현재 알려진 투명한 전도 물질 중에서 우수한 광투과도를 지니면서도 가장 높은 전도도를 유지하기 때문에 터치스크린, LCD, OLED, 태양전지 등에서 투명 전극의 재료로 폭넓게 활용되고 있다.^{2,3} 터치스크린 패널 제조를 위해 유리나 플라스틱 기판 위에 ITO를 성막한 후 전극 구조를 패터닝해야 한다. 현재 ITO 박막을 가공하기 위해 에칭 등이 사용되고 있으나 이는 다단계의 복잡한 공정들을 필요로 한다. 레이저 가공의 장점은 이러한 다단계의 공정 수를 줄이고 잦은 패턴 변경에도 유연하게 대응할 수 있다는 점이다. 특히 최근에는 정밀하고 미세한 패터닝을 위해 비열 공정을 기반으로 한 극초단 펄스 레이저를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.³⁻⁸

극초단 펄스 레이저는 기존의 레이저 보다 매

투고일 : 2013년 11월 19일 심사완료일 : 2013년 12월 19일

게재승인일 : 2013년 12월 26일

교신저자 : 최지연 ✉ jchoi@kimm.re.kr

우 짧은 펄스폭을 갖고 있어 레이저와 재료의 상호 반응시 재료에 열이 전달되기 전에 가공 부위에 효과적으로 에너지를 전달하여 가공이 완료되는 비열적(non-thermal)가공을 그 특징으로 한다. 이는 가공의 정밀도를 서브마이크론까지 높일 수 있으므로 초미세 가공에 매우 유리한 특성이다.⁴ 그러나 발진기에서 나오는 가우시안(Gaussian) 빔을 그대로 패터닝에 사용하면 가우시안 분포의 특성상 빔 중앙부와 경계의 빔강도(intensity)가 매우 다르기 때문에 패터닝의 균일도가 떨어진다. 따라서 패터닝 품질을 높이기 위해서는 강도의 분포가 균일하도록 빔을 셰이핑 하는 것이 균일한 미세 패터닝 형성을 위해 중요할 것으로 생각된다.

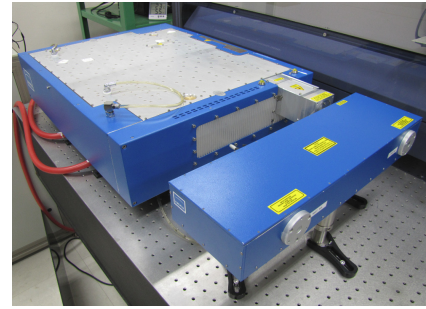
본 연구에서는 레이저 빔 경로에 사각형 개구(square aperture)를 갖는 슬릿 slit)을 적용하여 가우시안 빔을 사각형 quasi flat-top 모양으로 셰이핑 하였다. 가우시안 빔과 셰이핑된 빔을 이용하여 유리 기판위의 ITO 박막에 각각 선폭 10 μ m급의 도선 패터닝 가공을 수행하고 빔 형태에 따른 가공 특성을 살피기 위해 가공부 형상을 광학현미경, Atomic Force Microscope(AFM)로 관찰하였다. 끝으로 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy(EDS)을 이용하여 가공 조건당 ITO 제거율을 비교하였다.

2. 실험 방법

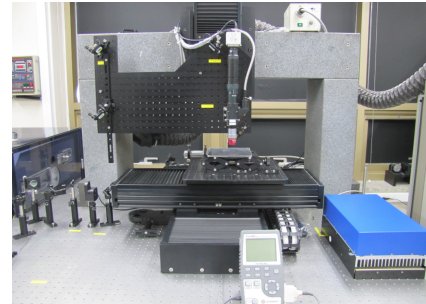
실험에 사용된 펨토초 레이저는 JENOPTIK사의 JenLas-D2fs로, 1027nm의 중심 파장을 가지고 펄스폭이 380fs, 반복률 30-200kHz, 최대 평균 출력 4W이다. Table 1에 레이저의 주요 성능지표를 나타내었다. Fig. 1은 펨토초 레이저의 모습과 이를 기반으로 가공시스템을 구성한 모습을 보이고 있다.

Table 1 Specifications of the femtosecond laser

Description	Operating data
Model	JenLas-D2fs
Manufacturer	JENOPTIK. Co. Ltd. Germany
Wavelength	1027nm
Pulse energy	40 μ J @100kHz
Pulse width	380fs
Polarization	Linear, 100:1
M ²	1.2



(a)



(b)

Fig. 1 Images of the JenLas-D2fs femtosecond laser (a) and the femtosecond laser processing system (b).

ITO 박막을 빔 강도 분포가 균일한 빔으로 가공하기 위해 펨토초 레이저의 빔 프로파일을 변형(shaping) 하였다. 레이저에서 출사하는 가우시안 빔의 중심부가 크기가 0.4mm \times 0.4mm 인 사각형 개구를 갖는 슬릿을 통과하도록 하여 quasi flat-top 형태로 변환하였다. 좁은 슬릿을 통과한 후 회절 현상에 의해 확산 하는 빔을 평행 빔으로 만들기 위해 20cm의 초점길이(focal length)를 갖는 plano convex 렌즈를 설치하였다. Fig. 2는 펨토초 레이저의 빔 셰이핑을 위해 슬릿과 plano convex 렌즈를 설치한 실험장치 구성도 (Fig. 2(a))와 beam shaping 과정을 통한 효과를 보이는 개념도 (Fig. 2(b)) 이다. Fig. 2(b)에서 보여지듯이 plano convex 렌즈에 의해 평행하게 진행되는 quasi flat-top 빔은 대물렌즈를 통과하여 시편 위에 집속되고 Fig. 2(c)에서 보는 바와 같이 시편에 사각형의 가공형상을 얻게 한다. Fig. 3(a)는 본 실험에 사용된 가우시안 빔의 프로파일로서 중앙부에 에너지가 높고 반경 방향으로 갈수록 에너지가 작아지는 것을 확인하였다.

Fig. 3(b)은 가우시안 빔을 Fig. 2(b)과 같이 변형한 빔의 프로파일로서 중앙부와 경계부의 에너지 분포가 비교적 균일한 quasi flat-top형태로 셰이핑 되었음을 관찰할 수 있다. 가우시안 빔과

quasi flat-top 빔의 빔크기는 각각 $2.03\text{mm} \times 2.08\text{mm}$, $3.52\text{mm} \times 3.75\text{mm}$ 로 측정되었다.

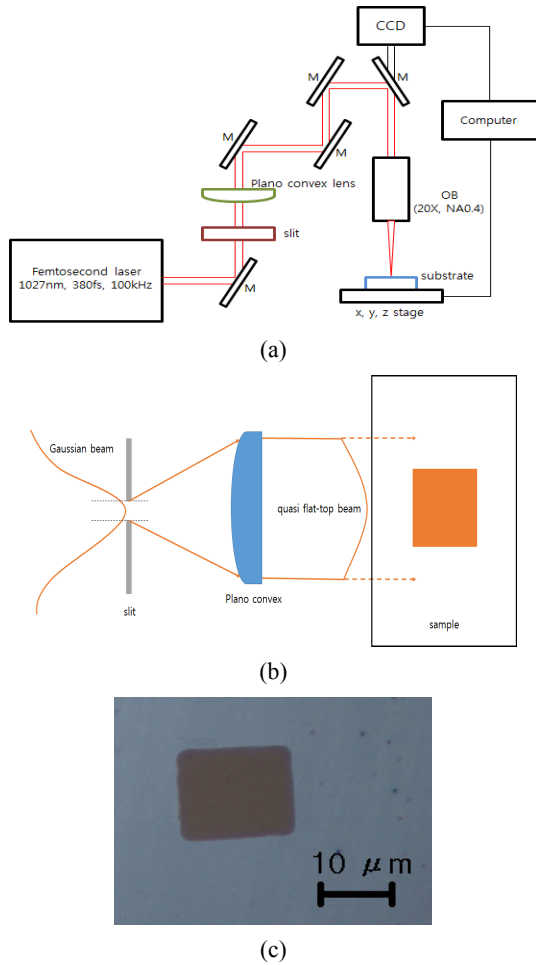


Fig. 2 Schematic depiction of a femtosecond laser micro-machining system with a variable slit (a), configuration of Gaussian-to-quasi flat-top beam shaping system (b) and an image of the ablated ITO film by a quasi flat-top beam.

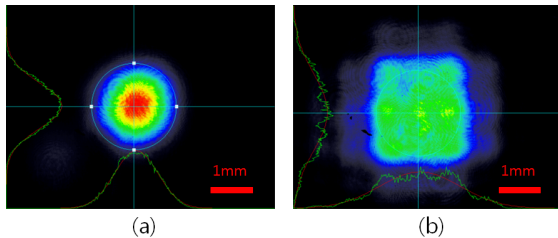


Fig. 3 A Gaussian beam profile (a) vs. a quasi flat-top beam profile (b).

3. 결과 및 고찰

3.1 가우시안 vs. quasi flat-top 패터닝

가우시안 빔과 quasi flat-top 빔의 가공 특성을 관찰하기 위하여 유리 기판위의 ITO 박막에 선폭 $10\mu\text{m}$ 급의 도선 패턴 가공을 수행하였다. 실험에 사용된 시편은 터치스크린패널의 유리 기판 위에 30nm 이하의 두께로 증착된 ITO 박막이다. 유리 기판에는 손상을 주지 않고 ITO 박막을 패터닝하기 위해 유리의 ablation threshold이하의 조건과 ITO 박막의 ablation threshold 이상의 조건 값으로 실험을 진행하였다. 도선 패터닝에 앞서 먼저 유리 와 ITO 박막의 ablation threshold를 측정하였으며 각각 $5.97\text{J}/\text{cm}^2$ 와 $0.19\text{J}/\text{cm}^2$ (intensity $15.7\text{TW}/\text{cm}^2$, $0.5\text{TW}/\text{cm}^2$)으로 얻어졌다. 측정된 ablation threshold는 기존 문헌들에서 얻어진 값들과 비슷한 범위이나 가공시 사용된 레이저 펄스 및 파장, ITO 박막의 두께 및 성막 조건에 따른 변화로 인해 약간 상이한 결과를 얻었다.^{3,7}

Ablation threshold를 결정한 후에 가우시안 빔과 quasi flat-top 빔을 이용하여 각각 $0.42\text{J}/\text{cm}^2$, $0.35\text{J}/\text{cm}^2$ (Irradiance $1.1\text{TW}/\text{cm}^2$, $0.92\text{TW}/\text{cm}^2$)의 에너지 밀도로 유리 기판 위의 ITO 박막에 $10\mu\text{m}$ 급의 도선 패턴을 가공하였다. 두 경우 모두 20 배의 배율을 가진 대물렌즈($\text{NA} = 0.4$)를 사용하여 가공 빔을 집속하였고 100kHz 의 반복률과 $10\text{mm}/\text{s}$ 의 가공 속도로 스캐닝하였다. 가공된 영역을 광학 현미경을 이용하여 가공 상태를 확인하였으며, 가공부의 깊이 및 형상의 정확한 분석을 위해 AFM을 이용하여 프로파일을 측정하였다. Fig. 4는 ITO가 제거된 영역의 광학현미경 측정 사진이다.

Fig. 4의 중앙에 나타나있는 굵은 선은 패널 제작시 미리 에칭이 되어있는 부분으로 위의 가공 조건에서 에칭(etching)된 부분에도 손상 없이 패터닝이 되는지 여부도 관찰하였다. Fig. 4(a)에서 보여지듯이 가우시안 빔을 이용한 가공부의 바닥면 A부분과 B부분의 제거양상이 다르게 보이는 것을 확인 할 수 있다. 반면 Fig. 4(b)에서 quasi flat-top 빔을 이용한 가공부 바닥면은 A'부분과 B'부분을 비교하였을 때 상대적으로 제거양상이 균일하게 보인다. 따라서 빔의 중심부와 경계부 강도의 차이가 상대적으로 적은 quasi flat-top 빔이 훨씬 균일한 패터닝을 수행함을 알 수 있다. 가공부의 형상 및 깊이가 프로파일을 정확하게 파악하기 위해 AFM을 이용하여 측정된 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

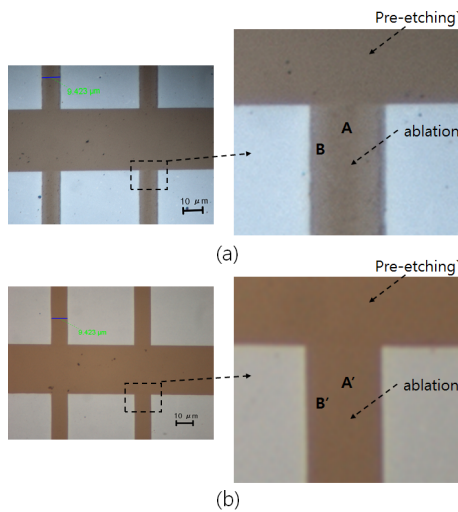


Fig. 4 Optical microscopy image of ITO film patterned by femtosecond laser with different beam shape: (a) gaussian, (b) quasi flat-top.

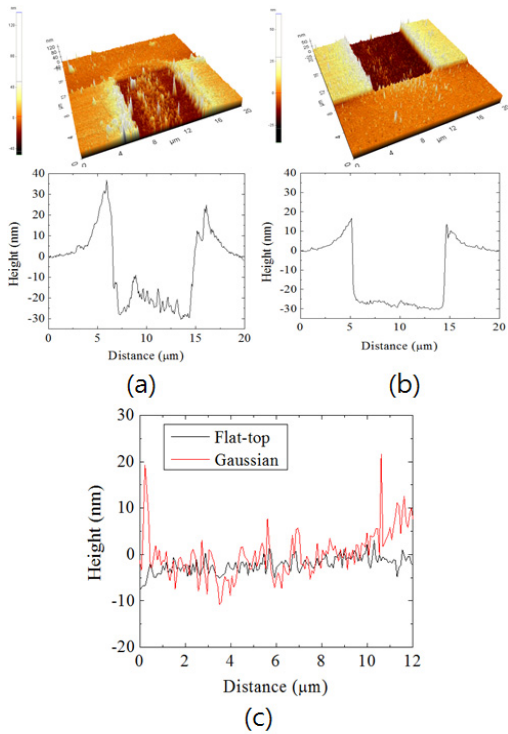


Fig. 5 AFM images of ITO film patterned by gaussian (a) vs. quasi flat-top (b) and bottom profiles along with the writing direction at ITO removed area (c).

두 조건 모두 유리 기판과 사전에 에칭된 영역에 과도한 손상 없이 패터닝 된 것을 확인하였다. 다만 Fig. 5(a)에서 가우시안 빔 가공의 경우 가공 중심부에서는 높은 빔강도로 인해 표면 상태가 거칠어진 것으로 보인다. 도선패턴의 단면 프로파일 측정 결과 Fig. 5(a)에서 가우시안 빔으로 가공된 패턴 경계부에서 솟아난 높이는 약 40nm 정도로 나타났으며, Fig. 5 (b)에서 quasi flat-top을 이용한 가공부 경계의 높이는 대략 20nm 미만으로 crater 생성이 억제된 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 5(c)는 각각의 빔에 의한 ITO 제거부의 바닥 프로파일을 종단 방향으로 측정한 것으로 가우시안 빔보다 quasi flat-top빔에 의한 가공부에서 바닥 표면이 훨씬 평탄하게 패터닝 되는 것을 확인하였다.

3.2 ITO 박막 가공조건 최적화

quasi flat-top빔에 의한 ITO 가공부의 광학형상 및 AFM 표면 프로파일을 관찰하면 ITO 박막이 거의 제거된 것처럼 보인다. 그러나 실제로 ITO 박막의 성분이 기판에서 제거되어 기능을 상실했는지는 알 수 없다. 따라서 quasi flat-top 빔에 의한 ITO 박막 제거 정도를 정확히 측정하기 위해 가공부에 EDS를 시도하여 ITO 박막의 주성분인 인듐(In)과 주석(Sn)의 잔존하는 atomic% 성분비를 측정하였다. EDS란 전자총에서 5-30kV로 가속된 전자빔을 시료표면에 조사하고 조사된 부위에서 특성 X선이 발생하면 이를 EDS 로 검지하여 구성원소의 조성을 검출하는 방법이다.

펄스에너지를 정량적으로 변화시켜가며 ITO 박막을 제거한 다섯 개의 가공부를 제작하였고 ITO 박막을 완벽하게 제거한 최적 조건을 찾기 위해 각 가공부에 EDS 측정을 실시하였다.

또한 가공전의 ITO 박막과 Fig. 4에 보여진 대로 패널 제작시 에칭되어 높은 저항을 띠는 영역도 함께 측정하여 참고값으로 삼아 비교 및 분석하였다. Table 2는 각 조건 당 측정 부위의 구성

Table 2 Atomic% of the components in ITO glass at laser patterned region, pre-etched, and pristine ITO area

atomic%	0.27J/cm ²	0.35J/cm ²	0.46J/cm ²	0.53J/cm ²	0.61J/cm ²	pre-etching	Before ablation
O K	61.96	61.55	61.95	61.89	61.95	62.01	59.68
Na K	2.86	3.01	3.26	2.96	3.00	3.33	2.66
Mg K	2.52	2.68	2.63	2.59	2.61	2.69	2.47
Al K	4.25	4.44	4.35	4.34	4.31	4.29	4.15
Si K	21.37	21.78	21.34	21.48	21.29	21.23	21.65
K K	5.23	5.26	4.74	5.00	5.22	4.86	4.86
Zr L	1.06	1.18	1.20	1.17	1.15	1.13	1.28
In L	0.60	0.51	0.54	0.57	0.48	0.36	2.96
Sn L	0.16	0.10	0.00	0.00	0.00	0.10	0.28

성분비를 나타낸 표이며 Fig. 6은 Table 2에서 인듐과 주석의 atomic%를 가공 에너지 밀도 및 빔 강도의 함수로 나타낸 그래프이다. ITO 박막과 유리 기판의 ablation threshold는 각각 보라색, 녹색 선으로 표시하여 모든 가공 에너지 밀도는 유리 기판과 ITO 박막의 ablation threshold의 범위 안에 설정되었음을 보였다. 그래프에서 푸른 선과 붉은 선은 각각 인듐과 주석의 참고값이다. 또한 실선은 가공되기 전의 ITO 박막의 인듐과 주석의 atomic%를 나타내며 점선은 사전에 에칭된 영역의 성분별 atomic%를 나타낸다.

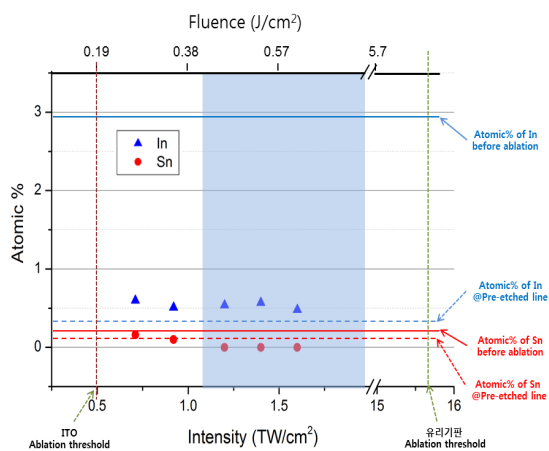


Fig. 6 Process window determined at the lower atomic% of Sn than pre-etched area (indicated in blue box).

본 연구에서는 최대한 유리 기판에 손상없이 패터닝하는 것을 목표로 하므로 In 및 Sn 두 성분을 모두 완전히 제거하기 보다는 ITO의 주성분이 pre-etched 영역 수준 이하로 기능적으로 제거되어 전도성을 잃는 것에 초점을 두어 가공하였다. 따라서 ITO의 제거 여부는 레이저로 가공된 부위가 사전에 에칭된 영역의 인듐 및 주석의 성분비와 유사하거나 낮으면 ITO 박막이 실질적으로 완전히 제거된 것으로 간주하였다. 이러한 방법으로 기판에 손상을 주지 않고도 적은 에너지로 효과적으로 ITO의 주요 성분을 제거할 수 있는 공정 윈도우를 결정할 수 있었다. 가공하지 않은 부위와 가공된 부위에 잔존하는 성분비를 비교해 볼때 ITO의 주성분인 인듐은 대략 83% 이상의 제거율을 보였고, 주석은 0.46J/cm² 이상의 에너지 밀도에서는 모두 제거되는 것을 확인하였다. 에너지 밀도가 0.35J/cm² 이하에서는 인듐(In)과 주석(Sn)성분이 모두 잔존하는 것으로

보아 유리 기판위의 ITO 박막이 완전히 제거되지 않았을 가능성이 큰 것으로 판단하였다. 이를 통해 유리 기판에 손상을 주지 않고 효과적으로 ITO 박막을 제거하는 가공 에너지 밀도의 범위는 0.46J/cm² 이상임을 결정하였다.

4. 결론

본 연구에서는 펄초 레이저에 슬릿과 plano convex 렌즈를 설치하여 가우시안 빔을 quasi flat-top 형태의 빔으로 빔 셰이핑하였고, 셰이핑된 빔을 이용하여 유리 기판위의 ITO 박막에 10μm급 도선패턴을 가공하였다. 가공된 시편은 광학현미경을 이용하여 1000배까지 확대하여 관찰하였으며, 가공부 형상의 정확한 파악을 위해 AFM을 이용하여 측정하였다. 그 결과, quasi flat-top빔을 이용한 가공부 주변의 crater가 훨씬 낮게 발생하였고, 가공부 바닥면이 상대적으로 평탄하였으며 debris 발생률 또한 낮은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 레이저에서 방출되는 가우시안 빔을 그대로 이용한 가공보다 빔 셰이핑된 quasi flat-top 빔을 이용한 ITO 가공이 더 효과적임을 실험적으로 입증하였다. 또한 EDS를 통해 quasi flat-top 빔에 의해 가공된 가공부의 잔존 성분을 확인한 결과, ITO 박막의 주성분인 인듐(In)은 약 83% 이상의 제거율을 보였으며, 주석(Sn)은 0.46J/cm² 이상의 에너지 밀도에서는 모두 제거되는 것을 확인 하였다. 본 결과는 가변 슬릿과 렌즈의 간단한 조합으로 얻을 수 있는 빔 셰이핑 기법이 ITO 박막 패터닝시 가공 품질 향상에 효과가 있음을 실험적으로 증명함으로써 실제 현장에서 디스플레이 패널상의 ITO 박막을 레이저로 가공할 때 DOE와 같은 고가의 광학계를 사용하지 않고도 손쉽게 quasi flat-top 분포를 형성하여 가공에 적용할 수 있는 품질 개선 방안을 제시하는데 의의가 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 KIAT 국제공동기술개발사업인 5인치 풀HD급 모바일 디스플레이 제조용 초미세 패터닝 시스템 개발과제(과제번호 : N0000702)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- 1) M. Henry, P.M. Harrison, J. Wendland, "Laser direct write of active Thin-films on Glass for industrial Flat Panel Display Manufacture," *J. Laser Micro/Nanoeng.* Vol. 2, No. 1, 2007.
- 2) D.A. Willis, A.L. Dreier, "Laser micromachining of indium tin oxide films on polymer substrates by laser-induced delamination," *J. Appl. Phys.*, Vol. 42, 2009.
- 3) M. Park, B.H. Chon, H.S. Kim, S.C. Jeoung, D. Kim, J.I. Lee, H.Y. Chu, H.R. Kim, "Ultrafast laser ablation of indium tin oxide thin films for organic light-emitting diode application," *Opt. Laser Eng.* Vol. 44, pp. 138-146. 2006.
- 4) 김영진, 김윤석, 김승만, 김승우, "펨토초 레이저의 원리 및 응용", *Korean Society of Laser Processing*, Vol. 27, No. 6, pp. 7-16, 2010.
- 5) M.F. Chen, W.T. Hsiao, Y.S. Ho, S. F. Tseng, Y.P. Chen, "Laser patterning with beam shaping on indium tin oxide thin films of glass/plastic substrate," *Thin Solid Films.*, Vol. 518, pp. 1072-1078, 2009.
- 6) Z. Kuang, W. Perrie, D. Liu, P. Fitzsimons, S.P. Edwardson, E. Fearon, G. Dearden, K.G. Watkins, "Ultrashort pulse laser patterning of indium tin oxide thin films on glass by uniform diffractive beam patterns," *Appl. Surf. Sci.* Vol. 258, pp. 7601-7606, 2012.
- 7) 손익부, 김영섭, 노영철, "펨토초 레이저를 이용한 플렉시블 ITO 패터닝 연구", *Korean Society of Laser Processing*, 13(1), pp. 11-15, 2010.
- 8) S. Krause, P.T. Miclea, F. Steudel, S. Schweizer, G. Seifert, "Precise microstructuring of indium-tin oxide thin films on glass by selective femtosecond laser ablation," *EPJ Photovoltaics.*, Vol. 4, 2013.