

# 펄초 레이저를 이용한 은 나노 와이어 필름 전기적 절연

## Electrical Isolation of Ag Nanowire Film using Femtosecond Laser

윤지욱<sup>1,2</sup>, 박정규<sup>1,2</sup>, 다니엘뵈머<sup>3</sup>, 세바스찬젠더<sup>3</sup>, 조성학<sup>1,2,✉</sup>  
Ji Wook Yoon<sup>1,2</sup>, Jung Kyu Park<sup>1,2</sup>, Daniel Boehme<sup>3</sup>, Sebastian Zander<sup>3</sup> and Sung Hak Cho<sup>1,2,✉</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 나노장비연구실 (Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute of machinery and materials)

<sup>2</sup> 과학기술연합대학원 (University of Science and Technology)

<sup>3</sup> 에넵틱 코리아 (JENOPTIK Korea Corporation, Ltd.)

✉ Corresponding author: shcho@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7077

Manuscript received: 2011.9.30 / Revised: 2011.11.16 / Accepted: 2011.11.23

*Electrical isolation of Ag nanowire, which is one of the candidates as electrode for display devices, on polymer with femtosecond pulse laser has been investigated. Line patterning to Ag nanowire with various pulse energy and scan speed were experimented. Duo to the results of the line patterning experiment, we fabricated the isolated squares and measured electrical resistance. The profile of the selectively ablated area was analyzed with AFM(Atomic Force Microscope). The width of the patterned line was 1.8  $\mu\text{m}$  and the depth was 1.6  $\mu\text{m}$ . We demonstrated electrical isolation of the Ag nanowire using femtosecond laser by evaluating the electrical resistance of the sample between isolated and opened area.*

Key Words: Femtosecond Laser (펄초 레이저), Electrical Isolation (전기적 절연), Ag Nanowire (은 나노 와이어)

### 1. 서론

산업이 점점 고도화 되면서 레이저를 이용한 정밀하고 친환경적인 가공방식의 필요성이 점점 부각되고 있다. 반도체, 디스플레이 산업과 같은 고집적 제품들의 경우 레이저를 이용한 정밀 가공 및 리페어 기술이 제품의 품질에 영향을 줄 정도로 높은 신뢰성을 가진 공정으로 자리잡고 있으며 기술적으로는 가공 주변부에 영향을 주지 않으면서 정밀하며 미세한 가공을 할 수 있는 기술개발이 필요해 지고 있다.

극초단 펄스 레이저는 레이저의 펄스 폭이 극단적으로 짧아 레이저 빔에 의해서 가공 부 주변의 열 영향을 최소화 할 수 있는 비열적 가공이며 그로 인해서 원하는 형상을 구현하는데 필요한 정밀한 가공이 가능하며 어떠한 재료도 가공이 가능

한 재료 무 의존성을 가지고 있다. 이와 같은 특성을 가진 극초단 펄스 레이저 가공의 장점은 정밀하고 섬세한 공정이 필요한 디스플레이 공정에 적합한 가공장비로서의 성능을 확보하고 있다.<sup>1</sup>

ITO(Indium Tin Oxide)는 높은 전도성과 가시광 및 적외선 영역에서 매우 우수한 투명도를 가지고 있어서 평판 디스플레이, 태양전지, 스마트 폰 터치 스크린, OLED 디스플레이 등에서 전극으로 많이 활용되고 있다.<sup>2</sup> 이런 장점 때문에 현재 레이저를 활용한 직접적인 전극 가공에서부터 리페어를 위한 연구에 이르기까지 다양한 연구가 진행되고 있다.<sup>3,4</sup> 하지만 ITO 는 깨어지기 쉬우며 독성이 강하고 생산 비용 또한 점점 더 증가하는 경향이 있어서 이를 대체할 수 있는 전극의 개발이 다양하게 이루어지고 있다.<sup>5</sup>

본 실험은 전극으로서 높은 전도도를 가지며

독성이 없고, 제조가 쉬운 장점을 가진 폴리머 기판에 증착된 은 나노 와이어(Ag nanowire)를 대상으로 수행되었다.<sup>6</sup> 은 나노 와이어는 일반적인 메탈계열의 전극과는 달리 플렉서블한 디스플레이 디바이스에 적용 될 수 있는 특징이 있다.<sup>7,8</sup> 실험은 펄스 레이저를 활용하여 폴리머 기판 위에 증착된 은 나노 와이어의 전기적 절연을 수행하는 것을 목표로 진행이 되었으며 시편은 250  $\mu\text{m}$  두께의 폴리머 기판 위에 70 nm의 두께로 증착된 은 나노 와이어이다. 실험에는 열 영향을 최소화하는 정밀한 가공을 수행하기 위해 펄스 레이저가 사용되었다. 실험은 은 나노 와이어의 어블레이션에 필요한 최소의 출력을 파악하고 고립된 형태의 사각형 모양으로 가공을 실시하여 가공부의 저항수치를 측정하는 순서로 진행되었다. 제작된 시편의 AFM(Atomic Force Microscope) 이미지를 통하여 가공부의 형상을 파악하였다.

**2. 실험 및 결과**

**2.1 실험 장비**

실험은 폴리머 기판 위에 증착된 은 나노 와이어의 전기적 절연을 진행하는 것을 목표로 수행되었다. 본 연구에 사용된 펄스 레이저 시스템은 크게 펄스 레이저와 빔 전송을 위한 광학계, X-Y 스테이지, Z 축 슬라이드로 구성되었다. 출력을 조절하기 위한 ND(Neutral Density)필터가 빔 전송구간에 위치하고 있으며 셔터 on/off 방식으로 레이저 빔을 조절하였다. 가공용 대물렌즈와 동일한 축에 설치된 CCD 카메라를 통해서 레이저 초점을 결정하고 가공상태를 모니터링 하였다.

정밀한 가공을 위해 50 배율 (NA:0.55)의 대물렌즈를 사용하였으며 모든 공정은 모션 컨트롤 소프트웨어가 설치된 컴퓨터를 통해서 진행되었다.

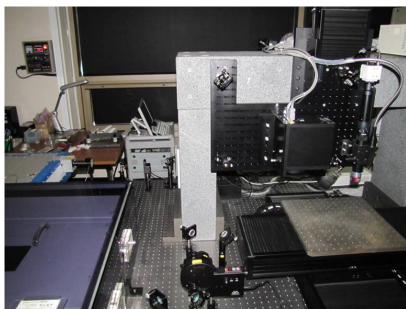


Fig. 1 Femtosecond laser processing system

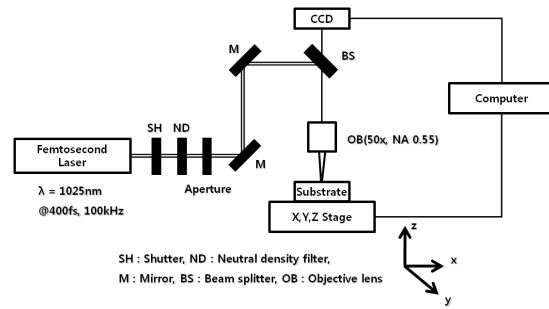


Fig. 2 Schematic diagram of laser micromachining system

Fig. 1 과 Fig. 2 에서는 실험에 사용된 펄스 레이저 시스템을 보여주고 있다. 사용된 레이저는 독일의 Jenoptik 사의 JenLas<sup>®</sup>D2.fs 모델이 사용되었으며 파장 1025 nm, 100 kHz 반복률, 펄스폭(FWHM) 400 fs, 평균출력( $P_{avg}$ ) 4 W 인 펄스 레이저이다. 펄스 레이저의 실제 이미지와 성능은 Fig. 3 과 Table 1 에서 확인할 수 있다.

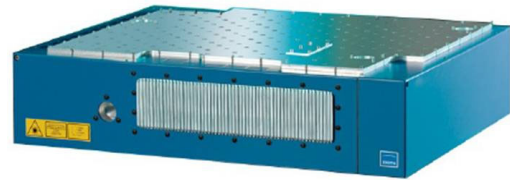


Fig. 3 Image of the femtosecond laser

Table 1 Specification of the femtosecond laser

Model	JenLas <sup>®</sup> D2.fs
Pulse duration	400fs
Max. Output power	4W
Repetition rate	100kHz
Beam quality( $M^2$ )	1.25
Wavelength	1025nm
Energy / pulse	40 $\mu\text{J}$

Fig. 4 에서는 은 나노 와이어 샘플의 구조를 나타낸 것을 표시하고 있으며, 250  $\mu\text{m}$  두께의 폴리머 기판에 은 나노 와이어가 70 nm의 두께로 올려진 구조이다. Fig. 5 에서는 시편의 실제 이미지를 보여준다.

실험이 완료된 샘플을 관찰하기 위해서 광학현미경을 (Nikon MM-60) 사용하였으며 가공부의 깊이 및 형상을 파악하기 위해서 AFM 장비로 측정을 실시하였다.

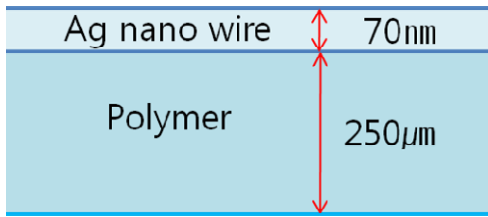


Fig. 4 Schematic image of the sample

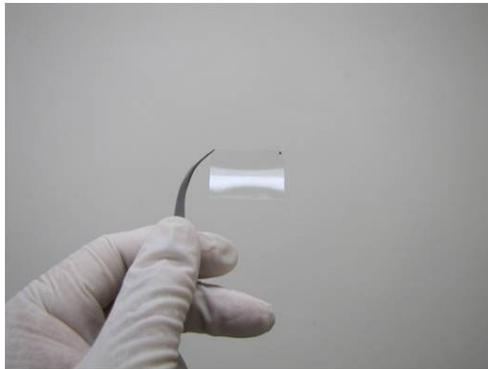


Fig. 5 Ag nanowire sample image

2.2 실험 결과

펄스 레이저를 이용해 폴리머 기판 위에 증착된 은 나노 와이어의 라인 가공 실험을 실시하였다. 샘플에 대한 펄스 레이저의 가공 성능을 파악하기 위해서 1mm 길이의 라인가공을 실시하였다. 다섯 가지 종류의 출력을 선정 [P<sub>a</sub> (E<sub>p</sub>) ; 평균 출력 (펄스 에너지) - 0.55 W (5.5 µJ), 0.64 W (6.4 µJ), 0.76 W (7.6 µJ), 1.02 W (10.2 µJ), 1.21 W (12.1 µJ)]하여 샘플 가공을 실시하였으며 각 출력 별로 여섯 가지 가공속도(0.5 mm/s, 1 mm/s, 1.5 mm/s, 2 mm/s, 2.5 mm/s, 3mm/s) 별로 샘플 가공을 실시하였다. Fig. 6 에서는 라인가공을 수행한 시편의 광학현미경 촬영 이미지를 나타내고 있으며, Fig. 7 에서는 실험 결과로 제작된 라인들의 선폭을 그래프로 표시하고 있다. 각 펄스 에너지(E<sub>p</sub>) 당 여섯 가지 가공속도로 샘플 제작을 수행하였으며 실험 결과 펄스에너지가 7.6 µJ, 10.2 µJ, 12.1 µJ 가공결과는 실험을 위해 선정된 가공 속도에 상관없이 모든 가공속도에서 라인가공이 이루어 졌다는 것을 알 수 있다. 또한 출력 6.4 µJ 와 5.5 µJ 의 결과에서 샘플의 가공을 위한 충분한 출력은 나오지 않았다고 판단되었다.

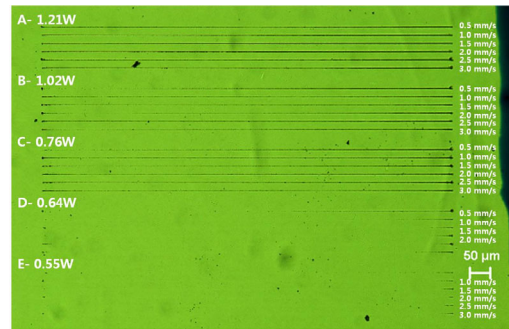


Fig. 6 Ag nanowire line laser patterning image (Scan speed : 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 mm/s)

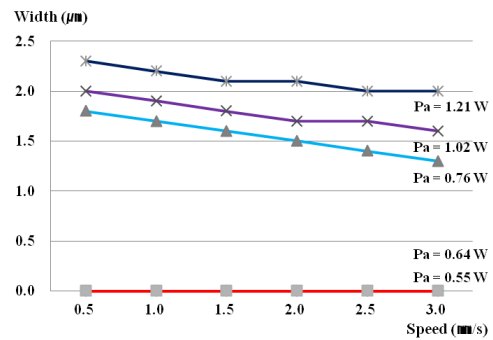


Fig. 7 Line width at different P<sub>a</sub> and scan speed (P<sub>a</sub> : average power)

선행된 실험결과를 바탕으로 고립된 사각형 형태의 형상을 제작하여 저항 값을 측정하는 실험을 실시하였다. 제작된 사각형상부분의 저항 값을 측정하여 완벽한 절연이 이루어 졌는지에 대한 실험을 수행하였다. 펄스 에너지가 10.2 µJ, 7.6 µJ 의 조건을 기준으로 실험을 수행하였으며 4 mm x 4mm 크기의 정사각형을 제작하였다. 가공 속도는 3 mm/s 의 속도였으며 x50 (NA:0.55) 가공용 렌즈를 사용하여 실험을 진행하였다. 측정 위치는 사각형상내부의 저항 값, 사각형상과 외부 사이의 저항 값, 사각형상의 외부의 저항 값을 측정하였다. 측정을 위한 간격은 일정하게 2 mm 간격으로 측정을 하였다.

펄스 에너지 7.6 µJ 조건으로 제작된 고립된 사각형상의 경우 사각형상의 내부와 외부 간의 저항측정 결과 저항 값의 측정이 이루어 지는 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 절연이 완벽하게 되지 않았다는 것을 알 수 있었다. 반면 펄스 에너지 10.2 µJ 로 제작된 시편의 경우는 사각형상

의 내부와 외부 사이의 저항 측정 시 저항 값이 OL(overload)로 측정되었으며 이 결과를 바탕으로 전기적 절연이 완벽하게 이루어진 것을 알 수 있었다. 사각형상의 내부 전기저항은 측정 시 1.97 kΩ, 외부 측정 시에는 2.14 kΩ으로 나타났다. Fig. 8 에서는 펄스 에너지 10.2 μJ 으로 제작된 정사각형의 시편을 광학현미경으로 촬영한 이미지를 나타낸 것이며 Table 2 는 제작된 사각형상의 측정 위치에 따른 저항 값의 측정치를 표로 나타낸 것이다.

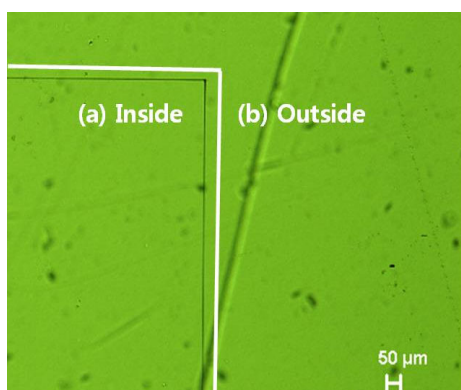


Fig. 8 Isolated rectangular laser patterning image (Pulse energy: 10.2 μJ)

Table 2 Resistance of the sample

	Inside (a - a)	Outside (b - b)	Between Inside & outside(a - b)
Resistance	1.97kΩ	2.14kΩ	Overload

제작된 시편의 가공 깊이 및 가공된 라인의 폭을 측정하기 위해서 AFM 장비를 이용해 프로파일을 구하였다. 측정부위는 가공된 사각형상의 한 변 부분의 중앙을 선정하였다. 측정결과, 가공형상부의 깊이는 대략 1.6 μm 정도인 것으로 나타났으며, 가공 라인의 폭은 1.8 μm 인 것을 알 수 있었다. 측정 결과, 샘플의 은 나노 와이어 층 두께인 70 nm 를 충분히 가공하고 완벽하게 절연할 수 있는 깊이를 구현하였다는 것을 확인 하였다. 또한, 가공된 라인의 주변부의 손상이 거의 없음을 알 수 있었다. Fig. 9 에서는 측정이 필요한 시편의 표면을 AFM 장비를 이용하여 구현된 AFM 이미지이며 프로파일의 측정이 필요한 부분을 표시하고 있다. Fig. 10 에서는 Fig. 9 에서 표시된 부분의 프로파일을 측정한 결과를 나타내고 있다.

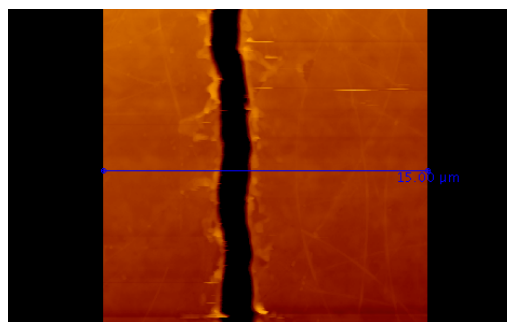


Fig. 9 AFM image of the sample

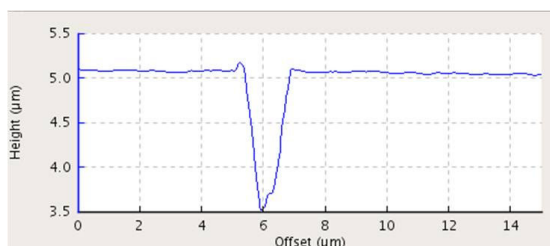


Fig. 10 AFM profile of the sample

### 3. 결론

펄스 레이저를 이용해서 ITO 를 대체할 성능을 가진 은 나노 와이어가 증착된 폴리머를 가공하여 전기적 절연을 이루는 것을 목표로 실험을 실시하였으며, 완벽하게 절연할 수 있는 실험결과를 얻을 수 있었다. 제작된 시편의 저항수치를 측정하여 제작된 샘플과 비교해서 절연이 이루어졌음을 확인하였으며, AFM 장비를 이용해서 가공된 선폭과 라인 프로파일들을 통해 가공된 시편이 완벽하게 절연 되었음을 알 수 있었다. 이 측정 결과들을 바탕으로 250 μm 두께의 폴리머 기판 위의 70nm 두께로 증착된 은 나노 와이어에 대한 펄스 레이저 전기적 절연 가공이 성공적으로 이루어졌음을 알 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 교육과학기술부 국가핵심연구센터개발사업 (No. R15-2006-022-01003-0)의 지원을 받아 수행된 연구 결과물입니다.

### 참고문헌

1. Cho, S., Park, J., Kim, J., Chang, W., Choi, D. and

- Wang, K., "Ultra-precision Machining using a Femtosecond Laser," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 6, pp. 17-23, 2010.
2. Mandamparambil, R., Fledderus, H., Van Steenberge, G. and Dietzel, A., "Patterning of Flexible Organic Light Emitting Diode (FOLED) Stack Using an Ultrafast Laser," *Optics Express*, Vol. 18, No. 8, pp. 7575-7583, 2010.
  3. Choi, H. W., Farson, D. F., Bovatsek, J., Arai, A. and Ashkenasi, D., "Direct-write Patterning of Indium-tin-oxide Film by High Pulse Repetition Frequency Femtosecond Laser Ablation," *Applied Optics*, Vol. 46, No. 23, pp. 5792-5799, 2007.
  4. Yu, J. Y., Cho, S. H., Park, J. K., Yoon, J. W., Wang, K. H., Sugioka, K., Hong, J. W., Heo, W. H., Boehme, D., Park, J. H. and Zander, S., "Selective Removal of Thin Film on Glass Using Femtosecond Laser," *Journal of Korean Society of Laser Processing*, Vol. 14, No. 2, pp. 17-23, 2011.
  5. Sin, H., Lee, H., Sung, J. and Lee, M., "Parallel Laser Printing of Nanoparticulate Silver Thin Film Patterns for Electronics," *Applied Physics Letters*, Vol. 92, No. 23, Paper No. 233107, 2008.
  6. Yu, Z., Zhang, Q., Li, L., Chen, Q., Niu, X., Liu, J. and Pei, Q., "Highly Flexible Silver Nanowire Electrodes for Shape-Memory Polymer Light-Emitting Diodes," *Advanced Materials*, Vol. 23, No. 5, pp. 664-668, 2011.
  7. Hu, L., Kim, H. S., Lee, J.-Y., Peumans, P. and Cui, Y., "Scalable Coating and Properties of Transparent, Flexible, Silver Nanowire Electrodes," *ACS Nano*, Vol. 4, No. 5, pp. 2955-2963, 2010.
  8. Axulai, D., Belenkova, T., Gilon, H., Barkay, Z. and Markovich, G., "Transparent Metal Nanowire Thin Films Prepared In Mesostuctured Templates," *Nano Letters*, Vol. 9, No. 12, pp. 4246-4249, 2009.