

## 적외선 레이저 공정을 통한 실버나노와이어 접합에서의 빔 펄스폭과 출력의 영향<sup>§</sup>

김주한<sup>\*†</sup> · 윤상우<sup>\*</sup>

\* 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

### Effects of Beam Pulse Width and Power Density in Silver Nanowire Welding Using Pulsed IR Laser

Joohan Kim <sup>\*†</sup> and Sang Woo Yoon <sup>\*</sup>

\* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

(Received April 14, 2014 ; Revised May 27, 2014 ; Accepted May 27, 2014)

**Key Words:** Pulsed Laser(펄스레이저), Silver(은), Nanowire(나노와이어), Micro Fabricatio(미세가공)

**초록:** 펄스 레이저를 적용한 실버나노와이어의 접합 영향이 연구되었다. 조사된 레이저 펄스 에너지는 실버나노와이어 네트워크에서 실버나노와이어간에 접합을 유도하였으며 이로 인해 투명 기저위의 실버나노와이어 네트워크 박막에 전기 저항값을 조절할 수 있었다. 특히 이러한 나노네트워크에서의 접합은 개별 나노와이어의 접촉점의 형태로 발생되었고 접합의 효과는 전체 실버나노와이어 네트워크의 전기저항 변화 측정으로 평가하였다. 또한 레이저 빔 펄스폭 및 레이저 평균 출력이 나노와이어 접합 비율 평가에 적용되어 연구되었다. 실버나노와이어 네트워크의 광학 특성도 관찰되었으며 이에 레이저 공정 요소 대비 효과도 연구되었다. 최적화된 레이저빔 적용 재료처리는 특화된 국부 재료 특성 개선에 장점을 보였다. 펄스 레이저를 이용한 실버나노와이어의 재료처리의 적용과 그 효과에 대해서도 논의한다.

**Abstract:** A direct pulsed laser process for welding and networking silver nanowires was developed. The welded nanowire network demonstrated modified electrical properties in a transparent substance. In particular, the welding points on the nanowires were investigated to measure the resistance at the connections. The level of networking in nanowires was explored with respect to various laser pulse widths and average power densities. In particular, the influence of laser beam density was investigated in detail. Selective laser treatment can be advantageous in imparting customized local property changes in transparent conducting materials. Various applications of the process are also discussed in this paper.

- 기호설명 -

- $k_{sp}$  : 표면플라즈몬공진의 웨이브벡터
- $k_x$  : 금속층의 웨이브벡터
- $k_0$  : 공기층의 웨이브벡터
- $\epsilon_m$  : 금속층의 유전율
- $\epsilon_m$  : 유전체의 유전율
- $\omega$  : 주파수

1. 서론

투명 전극 및 관련 소재는 디스플레이 산업과 태양광전지 산업의 성장과 더불어 그 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다.<sup>(1)</sup> 가장 많이 사용되는 투명전극은 ITO(indium-tin-oxide)로 불리는 유기물이며 디스플레이 등이나 광전소자에서 광의 투과성 및 전도성이 동시에 중요시되는 부품에 사용되고 있다.<sup>(2)</sup> 하지만 ITO 는 기계적 강도 및 안정성에 대한 제한이 존재하여 현재 다양한 곡면 및 유연 투명 전도성 소재에 대한 적용에는 문제가 있다. 이러한 응용품의 요구에 따라 유연한 표면에 박막

§ 이 논문은 2014 년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 라마다프라자호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, jooankim@seoultech.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

으로 처리되어 전도성을 가질 수 있는 소재 및 관련 공정이 연구되어 왔다.<sup>(3)</sup> 나노소재인 카본나노튜브와 실버나노와이어는 그 제조 공법이 잘 알려져 있고 나노소재로의 전기전도도가 좋아 ITO 투명전극을 대체할 수 있는 첨단소재로 연구되어 왔다. 특히, 실버나노와이어는 투명재료에 코팅 등을 통해 그 투명재료의 전기적 저항을 낮추는데 사용되어 질 수 있다.<sup>(4)</sup> 이러한 실버나노와이어는 나노사이즈의 선형을 유지하기에 다른 물질에 코팅이 되었을 때 투명도를 잘 유지할 수 있는 특성을 가진다. 이러한 장점으로 실버나노와이어를 이용한 전도성 투명전극의 연구 개발이 최근 활발히 수행되고 있다.<sup>(5)</sup>

레이저빔은 집속된 광에너지의 형태로 비접촉 에너지 전달의 원리를 가지고 있어 정밀 재료 가공에 있어서 그 관련연구가 활발히 수행되어 왔다.<sup>(6,7)</sup> 특히 레이저 조사를 통해 재료의 물성치 변환에 사용될 수 있으며 특히 전자산업에 있어 다양한 디스플레이 및 광전소자 개발에 적용되고 있다. 레이저빔을 이용한 재료처리는 국부적 선택적 소결이 가능하며 대상 박막 및 기저 소재에 대한 물성치 변환이 쉽다는 장점을 가지고 있기 때문에 기존의 공정을 대체할 수 있는 공정으로 주목 받고 있다. 일반적으로 적외선 파장인 1064 nm, 가시광선 영역인 532 nm 또는 자외선 파장인 355nm의 레이저 빔이 레이저 정밀 처리 공정에 적용될 수 있으며 빔의 연속성에 관련해서는 연속파와 펄스파로 나뉠 수 있다. 이러한 특성은 나노소재의 제작 및 가공 등에 적용될 수 있으며 탄소나노튜브나 실버나노와이어 등의 재료 처리에 사용된다. 앞서 기술된 바와 같이 실버나노와이어는 네트워크형태로 코팅처리될 수 있으며 외부 에너지를 통해 실버나노와이어간의 접합이 가능하다. 레이저가 도체인 나노와이어에 조사되면 나노와이어 사이에서 접촉된 부분에서 전자기장의 집중이 발생되며 이를 통해 강한 에너지장이 재료 표면에 국부적으로 형성되게 된다. 이러한 환경에서 국부적으로 접촉부위의 나노와이어의 온도가 상승하게 되고 전체의 나노와이어의 형상 변화 없이 접촉부위에서 접합이 발생한다. 이러한 원리는 표면플라즈몬공진효과(surface plasmon resonance)라고 보고되고 있으며 이러한 원리를 이용하여 레이저과장보다 작은 나노사이즈의 물질제거 및 접합이 가능하다.<sup>(8)</sup>

이러한 표면플라즈몬공진효과는 레이저빔의 웨이브벡터가 표면플라즈몬 웨이브벡터와 같은 방향

일 때 발생하며<sup>(9)</sup> 표면플라즈몬공진효과는 다음과 같은 식으로 그 입사광에 대한 방향을 설정할 수 있다.<sup>(10)</sup>

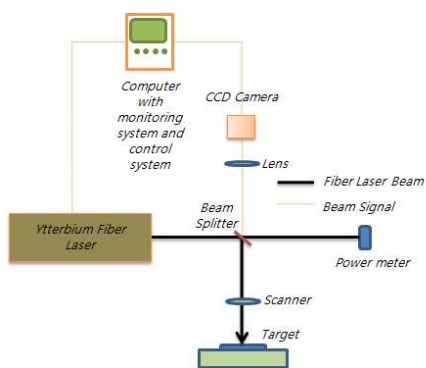
$$k_{sp} = k_x = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m(\omega)\epsilon_d}{\epsilon_m(\omega) + \epsilon_d}} \quad (1)$$

나노와이어 같은 선형 재료는 레이저의 조사부분이 나노와이어의 외경을 따라 원형으로 변하기 때문에 실제 그 조사된 레이저빔에 대한 입사각이 연속적으로 변하며 이에 따라 레이저빔의 웨이브벡터가 나노와이어금속의 표면플라즈몬 웨이브벡터와 같은 방향이 존재하며 이에 따라 표면플라즈몬공진효과가 발생된다. 하지만 이와 같은 경우에도 표면플라즈몬공진효과는 입사광인 레이저의 편광방향성을 가지며 레이저빔의 전자기장방향과 수직으로 배열되어 있는 경우에만 발생이 된다.<sup>(11)</sup> 이것은 무작위의 나노네트워크에 레이저빔을 조사했을 시 레이저빔의 전자기장방향의 수직방향으로 배열된 나노와이어만 표면플라즈몬공진효과가 발생하는 것으로 예상할 수 있기에 최대 50%의 나노접합 효율을 예상할 수 있다. 또한, 이러한 표면플라즈몬공진효과를 통한 나노와이어 접합에 있어 레이저의 특성이 중요한 역할을 하는데 기본적으로 레이저의 파장, 펄스의 평균출력, 그리고 펄스폭으로 나뉠 수 있다.<sup>(12)</sup> 또한, 이러한 요소들은 레이저빔과 재료와의 광열작용(photo-thermal) 또는 광화학작용(photo-chemical)으로 나뉠 수 있으며 접합의 경우에는 레이저의 광화학작용을 적용시키는 것이 접합에 있어 유리하다. 광열작용의 경우 나노와이어에 열이 발생되면 단순히 나노선형소재가 녹아내려 그 형태를 잃어버리는 현상을 예상할 수 있다. 하지만 짧은 펄스폭의 레이저 빔은 표면플라즈몬공진효과를 발생시키며 이를 통해 접합에서의 에너지 펄드의 집중으로 두 개의 나노와이어가 각각의 나노형태의 형태를 유지한 가운데 접합될 수 있다. 이러한 광화학반응은 일반적으로 펄스폭이 짧은 레이저 빔에서 주로 나타날 수 있다.

본 연구에서 실버나노와이어의 적외선 펄스 레이저 접합을 수행하였다. 적외선 펄스 레이저 빔의 공정 변수가 적절한 실버나노와이어 접합을 위해 선택되었으며 각각의 공정변수가 어떠한 경향으로 접합에 연관이 되어있는 지를 연구하였다. 또한 실버나노와이어 레이저 접합을 통해 전기저항의 변화와 공정 전후의 광학적 투과성을 확인해봄으로써 실제 본 공정의 투명 전도성 박막으로의 적용 효과를 알아본다.

**Table 1** Laser parameters in the process

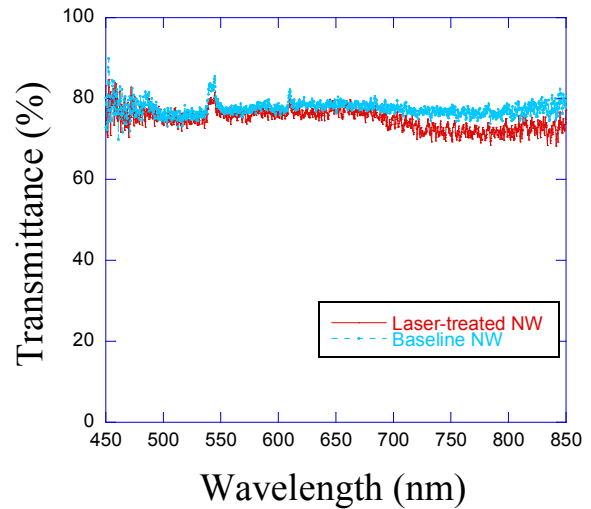
Laser power density	0.1–10 kW cm <sup>-2</sup>
Scanning speed	10–30 mm s <sup>-1</sup>
Pulse width	4, 30, 100, 200 ns
Defocusing	0, 1, 2, 3 mm
Pulse repetition rate	500 kHz

**Fig. 1** Schematics of laser setup

## 2. 실험방법

실험에 사용된 레이저는 펄스 파이버 레이저이며 빔 이송 시스템을 이용하여 실험에 사용하였다. 레이저 빔의 스캐닝 경로는 갈바노미터 스캐너를 이용하여 컨트롤되었고 마이크로 모션 스테이지를 이용하여 샘플 컨트롤을 하였다. 실험에 사용된 있으며 레이저 사용 공정 파라미터는 Table 1에 주어져 있으며 레이저 장치의 셋업은 Fig. 1에 나타나 있다.

실버나노와이어는 그 직경과 길이가 각각 30 nm와 10 ~ 20  $\mu\text{m}$  정도인 것이 사용되었으며 에탄올을 통해 슬라이드 글라스 표면에 도포되었다. 도포 시 나노와이어의 함량은 매질대비 0.5%이며 25 × 75 mm의 슬라이드 글라스에 도포된 것을 사용하였다. 도포된 실버나노와이어는 95 °C에서 건조하는 방법으로 준비되었다. 도포된 상태에서의 실버나노와이어의 저항은 50~100  $\Omega$ 으로 측정되었다. 실버나노와이어 접합은 레이저 직접 조사를 통해 수행되었으며 레이저 공정에 있어서의 주된 공정요소는 레이저 평균 출력(W), 레이저의 펄스폭(ns), 레이저의 초점위치(mm), 및 레이저의 스캐닝 속도(mm/s)이다. 이중 레이저의 출력과 초점

**Fig. 2** Optical properties of silver nanowire network

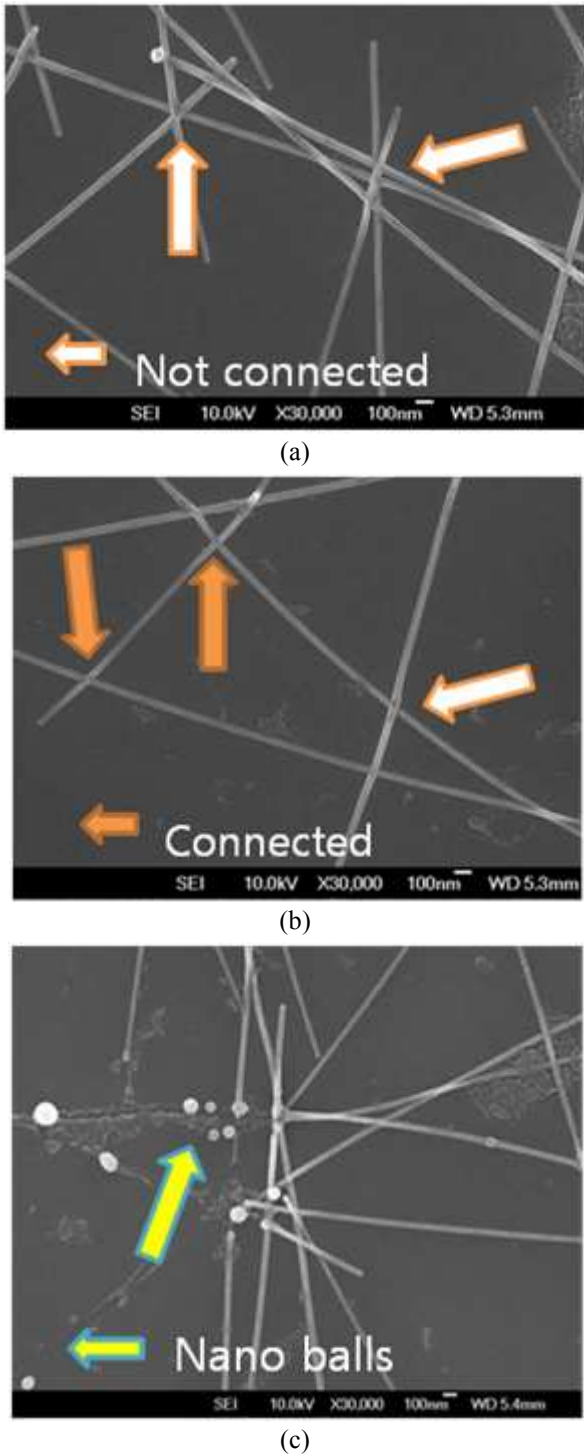
위치는 레이저의 평균 출력 밀도(kW/cm<sup>2</sup>)로 환산되어 해석하였다.

펄스 레이저 조사된 실버나노와이어 샘플은 그 광학적 투명도를 확인하기 위해 스펙트로미터를 사용하여 그 투과도를 측정하였다. 광학투과도는 1 nm의 펄스폭의 해상도로 450 - 850 nm의 범위에서 측정하였다. 또한 펄스 레이저의 공정 변수와 실버나노와이어의 접합을 주사전자현미경(SEM)을 통하여 직접 확인하였다. 접합된 샘플의 전기적 저항은 멀티미터를 이용하여 측정되었으며 실제 레이저 공정 변수에 대한 영향을 확인하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1 광학 투과도에 대한 영향

광학 투과도는 실버나노와이어의 투명 전도체 적용 응용에 있어서 중요한 요소이며 이에 대한 실험결과가 Fig. 2에 나타나 있다. 투과도는 슬라이드 글라스에 실버나노와이어 코팅을 한 샘플과 레이저로 네트워크 접합 처리된 샘플을 상대 비교하였다. 실제 측정은 UV 영역과 IR 영역에서보다는 실버나노와이어의 광학적 특성이 중요시되는 가시광선영역에서 중점적으로 수행되었다. 평균적으로 75-80%의 광학투과율이 측정되었으며 이는 코팅의 베이스인 슬라이드 글라스의 투과율이 평균 90 %인 것과 비교해볼 때 우수한 투과성을 가지고 있다고 판단된다. 실제 레이저로 처리된 샘플과 비교해볼 때 450 - 650 nm 영역에서는 3 % 이하의 투과율 저하가 측정되었으며 650 - 850 nm 영역에서는 10 % 정도의 투과율 저하가 측정되었다. 이러한 변화는 실제 나노와이어와 증착용 매개용액인 솔벤트가 레이저 조사에 의해 상변화를



**Fig. 3** SEM images of (a) not-connected silver nanowire network (no laser), (b) connected silver nanowire network and (power density =  $0.7 \text{ kW/cm}^2$ , repetition rate = 500 kHz), and (c) silver nano balls and silver nanowire network (power density =  $2.6 \text{ kW/cm}^2$ , repetition rate = 500 kHz)

일으키는 과정에서 투과율 저하의 효과가 나타난 것으로 판단된다. 전체적인 효과를 확인해 보았을 때 실버나노와이어의 레이저 조사에 따른 광학적

투과율의 변화는 가시광선 영역에서 적은 것으로 확인될 수 있다.

### 3.2 접합형상

레이저 조사에 따른 실버나노와이어 네트워크의 접합형상이 Fig. 3 에서와 같이 SEM 을 통해 분석되었다. Fig. 3(a)의 경우 레이저 조사전의 실버나노와이어 네트워크의 형상이며 실버나노와이어들이 접합이 아니라 상하로 겹쳐져 있는 형태를 주로 보여주고 있다. 이러한 경우 그 접촉에 따른 전기적 접촉저항의 증가로 전체 전기저항에 영향을 주고 있음을 유추할 수 있다. 레이저 조사에 의해 처리된 경우의 실버나노와이어 네트워크의 형상이 Fig. 3(b)와 같이 관찰되었다. 레이저 조사전과 비교해서 실제 나노접합이 된 부분이 관찰되었다. 이러한 나노접합은 모든 접촉부분에서 나타나지는 않았으며 레이저가 조사되었음에도 접합이 되지 않은 부분도 관찰되었다. 레이저 조사의 에너지가 접합 형성 에너지 보다 높거나 펄스폭이 길어지는 경우 나노 접합의 형상으로부터 실버나노와이어 네트워크의 형상이 없어지면서 각각의 실버나노와이어가 나노볼 형태로 상변화를 통해 변환되었다(Fig. 3(c)). 이러한 변화는 실제 네트워크의 단절을 유도하며 이를 통해 실제 나노와이어 네트워크의 전기적 특성이 전기저항의 증가로 변화될 수 있음을 유추할 수 있다.

### 3.3 레이저 펄스폭에 따른 저항변화

나노와이어 네트워크에 있어 표면플라즈몬공진 효과는 레이저의 펄스폭에 관계할 수 있다. 같은 레이저 출력에서 짧은 펄스폭은 레이저 조사 시 순간 조사 피크 출력을 높이며 이를 통해 표면플라즈몬공진효과를 증대시킬 수 있다. 이러한 이유로 레이저 펄스폭에 대한 나노 와이어 네트워크 접합의 영향이 확인될 필요가 있으며 이에 대한 결과로 레이저 펄스폭 변화에 따른 저항 변화가 Fig. 4 와 같이 얻어졌다. 레이저의 펄스폭은 4, 30, 100, 200 ns 로 조절되었다. 펄스폭이 길어짐에 따라 실제 접합효과가 떨어지고 역으로 저항이 더 높게 측정되었다. 이러한 현상은 펄스폭이 100 ns 이상일 경우 중점적으로 나타났다. 일반적으로 펄스폭이 짧을 수록 즉 4ns 또는 30 ns 에서 전기적 저항 감소의 효과가 크게 나타났다. 이러한 결과는 짧은 펄스폭의 레이저 빔인 경우 표면플라즈몬공진효과가 실버나노와이어 접촉부에 집중이 되어 실버나노와이어의 국지적 에너지 집중이 발생되고 이에 따라 실버나노와이어의 접합이 성공적으로

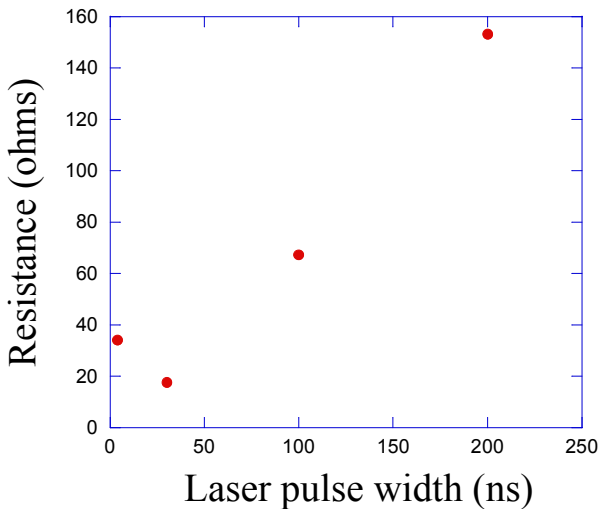


Fig. 4 Laser pulse width vs. resistance (laser power density =  $0.6 \text{ kW/cm}^2$ )

발생되는 것으로 판단된다. 반면에 펄스폭이 길어지는 경우 레이저 광열효과에 의해 나노와이어 전체에서의 온도상승이 발생되고 이에 나노와이어의 형체가 없어지고 나노 불형태로 뭉쳐 실제 네트워크의 단락의 효과가 나타나 전체의 저항이 증가되는 것으로 판단된다. 이러한 나노와이어의 나노 형태의 변환은 나노볼 형태로 SEM 을 통해 관측된 바와 같다.

#### 3.4 레이저 파워 밀도에 대한 저항변화

레이저 빔의 초점거리와 레이저 평균 펄스 출력을 변경함으로써 레이저 평균 출력밀도를 조절할 수 있다. 실버나노와이어 접합에 있어서 가장 중요한 공정 요소는 레이저 평균 출력 밀도이다. 레이저 평균 출력 밀도가 높은 경우 나노와이어가 어블레이션되어 실버나노와이어가 손상된다. 또한 어블레이션되지 않은 나노와이어는 상변화를 통해 나노와이어 네트워크의 형태로부터 나노볼 형태로 그 형상이 변화되고 전체적인 저항은 증가하게 된다. 적절한 레이저 평균 펄스 출력의 조사는 표면 플라즈몬공진효과에 의해 나노와이어들의 접촉부분에 국지적 전자기장집중이 발생되며 이로 인해 나노와이어 전체의 상변화 없이 접촉부분에서만 온도상승이 일어나게 된다. 이를 통해 순간적으로 접촉부의 접합이 발생한다. 이와 같은 접합은 앞선 SEM 사진의 관찰에서 검증되었다. 또한 이렇게 나노 접합이 발생한 나노와이어 네트워크의 경우 그 전기저항이 감소할 수 있다. Fig. 5 의 경우 레이저 출력밀도 대비 실버나노와이어의 전기저항을 측정할 결과이다. 실제 레이저빔의 조사전 실

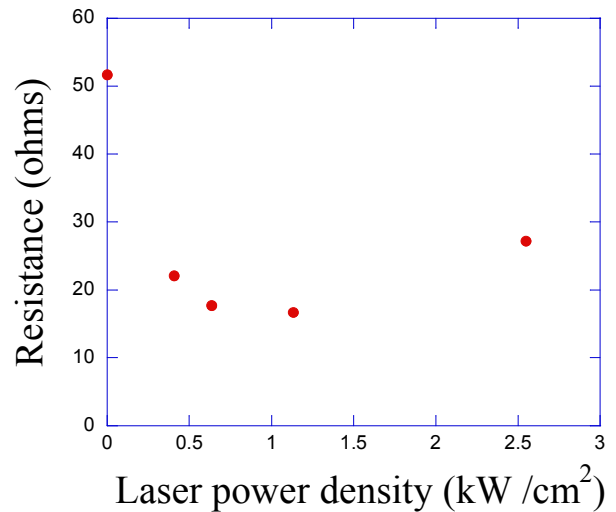


Fig. 5 Laser power density vs. resistance (Pulse width = 30 ns)

버나노와이어 네트워크의 전기저항은 50 ohms 이상으로 측정되었다. 레이저가 조사되었을 때는  $0.5 - 1.5 \text{ kW/cm}^2$  의 영역에서 그 저항값이 급격히 감소하였으며 이는 실제 실버나노와이어 네트워크에서 나노 접합이 발생한 구간으로 해석할 수 있다. 레이저 출력밀도가 이보다 높아지면 전기저항값이 다시 상승하였다. 실제 적용에 있어서는 유한한 직경의 레이저빔을 조사하므로 중첩된 조사면이 존재하며 이러한 것이 실제 코팅면에 있어서의 나노 접합에 초과된 에너지를 통한 영향을 줄 수 있다. 그러므로 실제 대면적의 레이저를 통한 나노와이어 네트워크 접합은 측정된 출력밀도보다 더 낮은 영역으로 조절해야 할 것으로 판단된다. 중첩된 레이저 빔 조사의 영향은 또한 레이저 펄스폭과 관련 있으며 이러한 부분은 관련 모델링 및 추가 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

펄스레이저의 조사를 통해 실버나노와이어 네트워크의 국소 나노 접합을 수행하였다. 적절한 레이저 공정 변수의 적용으로 나노 접합이 가능하였으며 실버나노와이어가 레이저 빔에 의해 그 형태가 유지된 상태에서 나노와이어들간의 접촉에서 접합이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 접합된 실버나노와이어 네트워크의 광학적 투과성은 레이저 처리되기 전과 비교해 볼 때 3 ~ 10 %의 투과율 감소가 측정되었다. 또한, 과도한 레이저 출력 밀도 또는 길어진 펄스폭에서는 나노와이어의 형태가 나노볼의 형태로 관찰되었으며 이것은 접합의 효과에서 벗어나 나노와이

어의 전기적 특성을 바꾸는 상변화로 결론 내릴 수 있다. 실험적인 정략적 해석에 있어서 실버 나노와이어 네트워크 접합은 30 ns 이하의 레이저 펄스에서 저항감소의 효과를 얻었으며 레이저 펄스폭이 길어짐에 따라 그 저항값이 상승하였다. 또한, 레이저 빔의 출력밀도는 0.5-1.5 kW/cm<sup>2</sup> 에서 저항감소가 가장 뚜렷하게 나타났으며 이 영역 밖에서는 그 저항값이 다시 상승하는 효과가 관찰되었다. 본 연구를 통해 실버 나노와이어 코팅이 적용된 면에서의 전기적 저항특성이 레이저의 공정변수와 관계 있으며 최적화된 공정변수선택에 의해 광학적 투과도에 대한 큰 저하 없이 전기적 저항의 개선된 효과를 기대할 수 있는 것으로 결론 내릴 수 있다.

### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌 (References)

- (1) Reinhard, M., Eckstein, R., Slobodskyy, A., Lemmer, U. and Colsmann, A., 2013, "Solution-Processed Polymer-Silver Nanowire Top Electrodes for Inverted Semi-Transparent Solar Cells," *Organic Electronics*, Vol. 14, pp. 273~277.
- (2) Chuang, H.-C. and Lee W.-F., 2014, "Parametric Optimization of Nd-YVO<sub>4</sub> Laser for Straight Scribing on Silver Nanowire Based Conductive Thin Films by Taguchi Method," *Optics & Laser Technology*, Vol. 57, pp. 149~153.
- (3) Krajcar, R., Siegel, J., Slepicka, P., Fitl, P. and Švorčík, V., 2014, "Silver Nano Wires Prepared on PET Structured by Laser Irradiation," *Materials Letters*, Vol. 117, pp. 184~187.
- (4) Madaria, A. R., Kumar, A. and Zhou, C., 2011, "Large Scale, Highly Conductive and Patterned Transparent Films of Silver Nanowires on Arbitrary Substrates and Their Application in Touch Screens," *Nanotechnology*, Vol. 22, p. 245201.
- (5) Qin, Y., Cao, W., and, Zhang, Z., 2013, "Surface Plasmon Polariton Coupling Between a Metal Nanowire and a Metal Helix," *Optik*, Vol. 124, pp. 5363~5365.
- (6) Chang, W., Choi, M., Kim, J., Cho, S. and Whang, K., 2004, "Nanoscale Patterning Using Femtosecond Laser and Self-Assembled Monolayers," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A.*, Vol. 28, No. 9, pp. 1270~1275.
- (7) Chu, S. J. and Zhao, J., 2012, "Fatigue Test of Remote CO<sub>2</sub> Laser Welded Joints and Its Analysis," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A.*, Vol. 36, No. 10, pp. 1213~1219.
- (8) Garnett, E. C., Cai, W., Cha, J. J., Mahmood F., Connor, S. T., Christoforo, M. G., Cui, Y., McGehee, M. D. and Brongersma, M. L., 2012, "Self-Limited Plasmonic Welding of Silver Nanowire Junctions," *Nature Materials*, Vol. 11, pp. 241~249.
- (9) Zeng, S., Yu, X., Law, W. -C., Zhang, Y., Hu, R., Dinh, X. -Q., Ho, H. -P. and Yong, K. -T., 2013, "Size Dependence of Au NP-Enhanced Surface Plasmon Resonance Based on Differential Phase Measurement," *Sensors and Actuators B*, Vol. 176, pp. 1128~1133.
- (10) Hooper, I. R. and Sambles, J. R., "Dispersion of Surface Plasmon Polaritons on Short-Pitch Metal Gratings," *Physical Review B*, Vol. 65, p.165432.
- (11) Schider, G., Krenn, J. R., Gotschy, W., Lamprecht, B., Ditlbacher, H., Leitner, A. and Aussenegg, F. R., 2001, "Optical Properties of Ag and Au Nanowire Gratings," *Journal of Applied Physics*, Vol. 90, pp. 3825~3830.
- (12) Chuang, H.-C. and Lee, W. -F., 2014, "Parametric Optimization of Nd-YVO<sub>4</sub> Laser for Straight Scribing on Silver Nanowire Based Conductive Thin Films by Taguchi Method," *Optics & Laser Technology*, Vol. 57, pp. 149~153.