

나노간극에 발생하는 전기방전의 실험적연구

이영민*·최해운**†

* 한국폴리텍 VI 대학 컴퓨터응용금형학과, ** 계명대학교 기계자동차공학과

Experimental Study on Electrical Discharge in Nanoscale Gaps

Young Min Lee* and Hae Woon Choi**†

* Dept. of Applied Computer Mold design, Korea Poly-tech VI

** Mechanical and Automotive Engineering, Keimyung Univ.,

(Received September 11, 2010 ; Revised February 11, 2011 ; Accepted February 14, 2011)

Key Words: Nanogap(나노간극), Electrical Discharge(전기방전), Micromachining(마이크로가공)

초록: 나노간극에서 발생하는 전기방전에 대해서 실험적으로 연구하고 그 결과를 분석하였다. Pt-Ir 합금으로 구성된 음극과 금으로 박막코팅된 양극사이에 전기방전을 하였다. 음극과 양극에서 전기장을 10V~80V 범위에서 제어하였으며, 간극은 50nm 에서 800nm 로 제어하였다. 이때 발생된 전기방전신호, 쇼트신호 등은 간접적으로 나노간극에서 발생하는 현상들을 이해할 수 있었다. 실험결과 전기방전은 전기장과 음극의 전극첨단의 반경에 매우 밀접하게 관련이 있었다. 작은 간극에서 발생하는 전기방전은 비교적 산포도가 크고 랜덤한 형태를 보였으며 음극 전극첨단의 반경에 민감하게 반응하였다.

Abstract: We present an experimental study of electrical discharge in nanoscale gaps. The discharge occurred between a cathode made of sharpened Pt-Ir wire and a gold-plated anode. Electric discharges were detected for electric potentials from 10 V to 80 V, and their gaps ranged from 50 nm to 800 nm. The spark signals indirectly showed spark phenomena such as discharges or shortages in the system. The sparks and discharges strongly depended on the electric potential (voltage) and the radius of the tips. For small gaps, the electrical discharge was random and strongly depended on the radius of the cathode tips.

- 기호설명 -

- Q : 입열량 (J)
- V : 인가전압 (V)
- I : 회로전류 (A)
- t : 인가시간 (sec)
- P : 회로의 전력 (Watt)
- α_{pt} : 백금의 열팽창계수 ($\mu\text{m}/\text{mK}$)
- α_{lr} : 이리듐의 열팽창계수 ($\mu\text{m}/\text{mK}$)

1. 서론

공정기술의 발달로 인하여 소자의 크기가 작아짐과 동시에 집적도 또한 많이 높아지게 되었다.

소자의 집적도는 공정기술의 개선으로 인해서 안정적으로 소자를 만드는 기술도 필요하지만, 소자가 작동시 주위 다른소자와 오작동을 하지 않도록 적절한 공간을 확보하는 것도 중요한 요소 중의 하나이다.

소자의 간격이 지나치게 가깝게 되면, 소자간의 전기장(Electric field)이 급격하게 커지면서 전기방전을 일으켜서 소자의 기능이 떨어질 수 있는 위험성을 지니게 된다.^(1,2) 특히, 자동차전자화 부품의 경우 오작동시 자칫 운전자 및 보행자의 생명의 위협으로까지 이어질 수 있으므로, 관련분야 부품 설계가 매우 신뢰도 깊게 이루어 져야 한다.

의료기기의 경우도 마찬가지로 인체내 임플란트 할 수 있는 전자기기 예를들면 심장박동기, 인공심장 및 기타 재활장치의 경량화 및 소형화가 이루어 지면서 관련 부품의 소형화가 필수불가결하지만 안정성도 동시에 보장되어야 하기에 신뢰도 높은 공정기술이 필요하다.⁽³⁾

† Corresponding Author, hwchoi@kmu.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

이러한 공정기술에 앞서서 소형화된 부품간의 신뢰도 높은 동작을 위한 회로의 설계가 중요한데, 기계공학적인 관점에서 보면 회로간의 간격을 최소화함과 동시에 전기장의 영향을 주지 않도록 소자가 설계되어야 한다. 전기소자의 소형화는 에너지절감에도 기여를 하며, 안정적인 생산기술이 갖추어지면 소재의 양도 줄여서 원가절감에도 기여할 것으로 기대된다.

소자의 전기방전 문제는 비교적 큰 스케일의 자동차 부품뿐만 아니라, 최근 보편화 되어 있는 MEMS (Micro Electronic Mechanical System)나 NEMS(Nano Electronic Mechanical System) 기술에도 많은 문제가 되고 있다. 특히, 극미세 장비에서 발생할 수 있는 전기적 스파크는 소자의 소형화를 막는 걸림돌이 되고 있다.^(4,5)

이러한 스파크에 대한 문제점을 해결하기 위해서는 나노스케일의 방전현상에 대한 정확한 이해가 필요하며, 이를 위해서 본 논문에서는 나노스케일 간극으로 이루어져 있는 두 전극에 전기장을 가하여서 발생하는 전기방전을 실험하여 전기장파 전극사이의 간격에 따른 상관관계를 연구한 실험적 결과를 소개하고자 한다.

2. 실험의 방법

2.1 실험장치의 구성

실험장치는 크게 전원소스(Power supply), 측정장비(Data Acquisition System), 전극(Electrodes) 및 구동장치(Actuator)로 나누어 볼 수가 있다. 먼저 전원소스는 -110V 에서 +110V 영역에서 정전류 및 정전압을 안정적으로 공급할 수 있는 정전압정류 전원장치를 구성하였다.

또한 회로를 통해 흐르는 전류를 측정하기 위해서 25kHz 에서 1GHz 의 영역을 감지하는 AC 전류 프로브(Current probe)가 설치 되었다. 실시간으로 데이터를 측정하기 위하여 초당 200MS/s 의 데이터를 샘플링 할 수 있는 오실로스코프를 이용하였다.

음극(Cathode)으로는 80Pt-20Ir 의 성분으로 하여 끝부분이 수백 nm 의 반경을 가지는 첨단전극이 설치되었다. 양극은 200 μ m 두께의 절연 유리판 위에 100nm 두께의 금박을 코팅한 서브스트레이트가 설치 되었다. 양극(Anode)은 수십나노미터에서 수마이크로미터의 간격을 유지하도록 하였으며, 회로의 중간에는 회로에 흐르는 전류량을 제어하기 위한 정전류제어다이오드(Current Limiting Diode, CLD)가 설치 되었다.

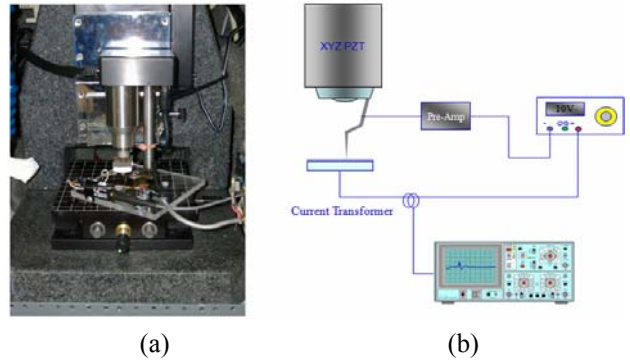


Fig. 1 (a) Experimental setup (b) Schematic

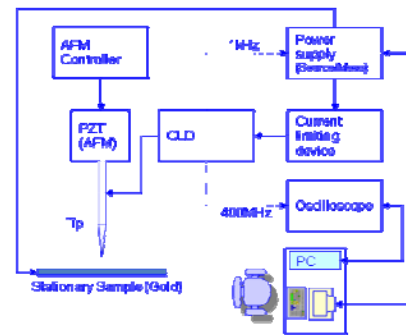


Fig. 2 Schematic for experiment algorithm

음극에 설치된 80Pt-20Ir 전극은 나노미터 정밀도로 움직일 수 있도록 하기 위해서 피에조액추에이터(PZT)에 설치 되었으며, 실험장치와 간략도가 Fig. 1 에 도시되어 있다.

양단의 간격을 1 μ m 이하로 유지하면서 일정 전압을 가하였을 경우, 전류가 흐르지 않다가 일정 임계치에 이르게 되면 갑작스런 전류의 흐름이 발생하면서 교류파형의 전류의 흐름이 발생되게 된다. 이를 AC 전류프로브가 감지를 하게 되고, 오실로스코프를 트리거 시켜서 데이터를 측정하며, 동시에 PZT 로 유지된 간격과 전원장치의 데이터가 실시간으로 컴퓨터에 전송이 된다. 데이터 흐름 및 측정에 대한 간략도가 Fig. 2 에 도시되어 있다.

2.2 전극의 준비

본 실험에 있어서 중요한 변수중의 하나는 음극에 설치된 80Pt-20Ir 전극이다. 전극의 소재로는 250 μ m 지름의 와이어를 사용하였고, 전극 첨단(Sharpened tip)을 위해서 와이어를 CaCl₂, H₂O 그리고 아세톤을 혼합한 용액내에서 평균전압 20V 와 60Hz 교류전원을 공급하면서 에칭을 시행하였다.

1 차로 에칭된 팁은 마이크로 폴리싱을 위해서

추가적으로 52g 의 CaCl_2 와 200ml 의 H_2O 그리고 약 200ml 의 HCL 을 혼합한 용액에서 정밀 에칭 작업을 실시하였다.

양극(Anode)에는 탄소막대를 사용하였고, 음극에는 80Pt-20Ir 를 공급하였으며, 공급전원을 육안으로 모니터링 하면서 전류량이 급격히 떨어져서 30mA 이하 일 때, 전원을 차단하여 팁에칭을 완료하였는데 전류량은 30mA 에서 0mA (단락) 로 순간적(0.5 초이내)로 감소하였다. 30mA 전원차단은 매우 중요하며 고전류에서의 전원차단과 저전류에서의 전원차단시의 팁 모양이 Fig. 3 에 나타나 있다.

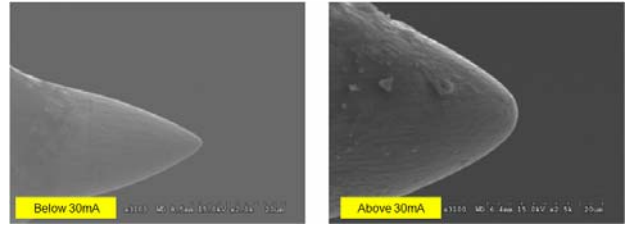


Fig. 3 Tip etching at (a) below 30mA (b) above 30mA

Fig. 3(b)에서 보여진 바와 같이, 30mA 전류 도달 이전에 전류가 선행 차단될 시 팁의 첨단 곡률반경이 5 μm 이상으로 나타난 반면 전류차단이 30mA 이하에서 시행된 경우는 첨단 곡률반경이 1 μm 이하로 에칭 품질이 양호한 것으로 나타났다.

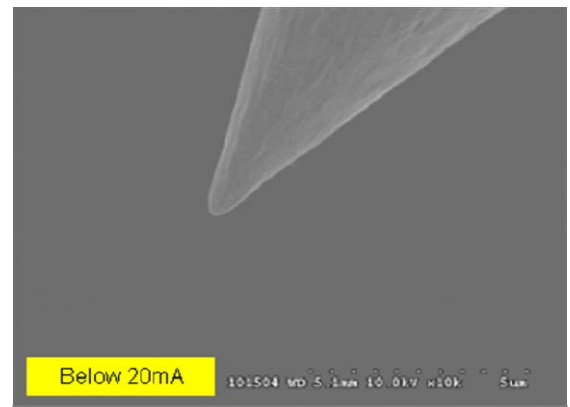


Fig. 4 Etched tip by below 20mA current

나아가, 공급전류가 20mA 이하에서 차단 될 경우 에칭의 첨단이 매우 양호하며 첨단 반경도 500nm 이하의 정밀도를 가질 수가 있었다 (Fig. 4 참조). 완성된 Tip 은 초음파 세척을 통해서 이물질을 제거하였으나 초음파 세척시 발생하는 공기방울이 Tip 을 상하게 하는 경우도 있어서, 용액내 용액을 사용하여 팁을 보호하였다.

결론적으로 최저 전류영역에 도달할 때까지 팁을 에칭하는 것이 이상적이지만, 50mA 이하에서 0mA 까지 도달하는 시간이 불과 5 초 이내이며, 특히 30mA 이하의 영역의 경우 가늘어진 팁에 자중에 의한 네킹(necking)이 순식간 (0.5 초 이내) 발생하여 순간의 전원차단이 아주 어려워 균일한 형태의 팁 생성이 어려웠다.

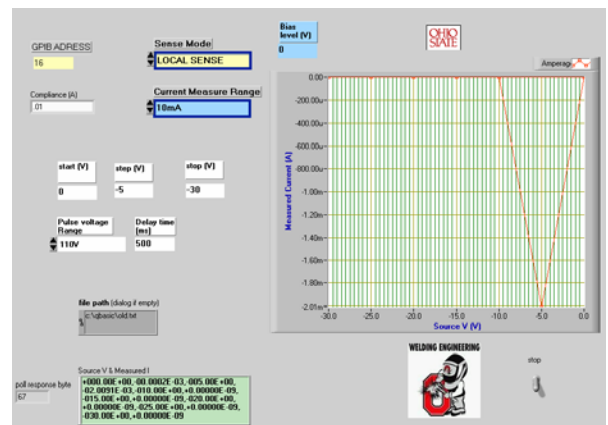


Fig. 5 Graphic user interface for experiments

Tip 반경의 제어는 다양한 요소에 의해서 변화되는데 양극에 설치된 탄소막대의 상태, 에칭액의 농도 및 전류제어의 정도에 영향을 받았으며 그중에서 전류제어에 가장 민감한 것으로 실험결과 조사되었다.

2.3 GUI (Graphic user interface)구성

구성된 회로와 실험장치에 전압을 인가하고 양극간의 간격제어를 위해서 Visual Basic 프로그래밍을 이용하였다. Fig. 5 에서 나타난 바와 같이 프로그램은 크게 일정간격을 유지한 상태에서 전압을 변환시키는 모드와, 전압을 고정시킨 상태에서 간격을 변화시키는 모드로 구성을 하였다. 이를 위해서 전압조정장치를 시리얼 통신을 통해서 제어하고, 오실로스코프 데이터를 GPIB network 를 통

해서 추출할 수 있도록 구성하였다. 또한, 전극간 간격을 유지하기 위하여 PZT 를 구동하며 PZT 구동을 전용포트 통신을 실시간 구동하도록 실험장치를 구성하였다.

2.4 전자소자의 특성

실험에 사용된 정전류제어다이오드(CLD)는 수나노초 (nanosecond, 10^{-9} second) 라는 극히 짧은 순간에 회로에 급격히 일어나는 전류를 미세하게 조절할 수 있도록 하여야 하며, 회로 전체의 임피던

스 상승에 영향을 주지 않도록 기능이 설계되어야 한다. 또한, 회로에서 반대로 작용할 수 있는 역전류의 흐름을 차단하여서 반드시 음극에서 스파크가 시작되도록 하는 다이오드기능을 동시에 유지하여야 한다.

저항과 다이오드의 조합으로 동일효과를 구현할 수 있으나, 본 연구에서 GHz 영역에서의 작동 성능이 보장 되질 않아서 상용 CLD 를 사용하였다. CLD 특성을 알아보기 위해서 Fig. 6 와 같이 회로에 임펄스 전압을 가하여 CLD 의 전류 제어특성을 알아 보았다. 실험결과 그림에서 나타난 바와 같이 정전압 (Forward bias) 시 2mA 용량의 CLD 가 2V ~ 80V 영역에서 전류조정이 잘 일어나는 것을 알 수가 있었다. 2V 미만에서는 충분한 전류조정이 일어나지 못함을 볼 수가 있는데, 이는 전압공급장치의 저전압 영역에서 비선형 특성에 기인한 것으로 추측된다.

동일한 회로에서 역전압 (Reverse bias)를 가할 시 CLD 의 반응을 측정해 보았다. 결과에서 나타난 바와 같이 전류제어 기능을 하지 못하고 전원장치에서 회로보호 목적으로 지정해놓은 10mA 까지 허용하는 것을 볼 수 있었으며, 결과적으로 정방향제어와 역방향 허용의 CLD 다이오드 특성을 잘 나타내어 주었다.

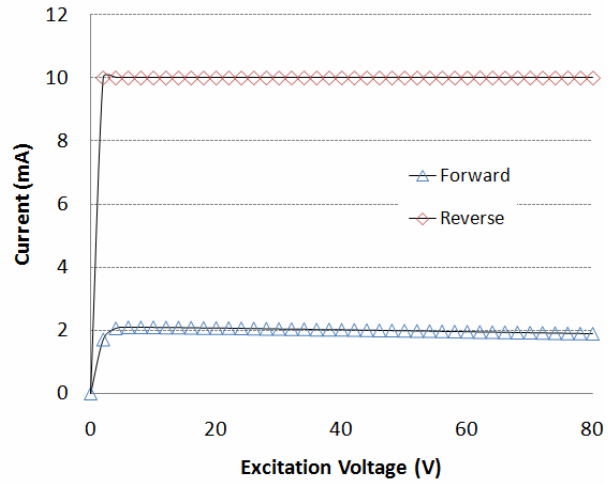
정방향 (forward bias) 최대전류치를 35 μ A, 175 μ A, 500 μ A, 2mA, 그리고 4mA 로 제어하기 위하여, 35 μ A, 175 μ A, 500 μ A, 2mA, 그리고 4mA (두 개의 2mA 병렬연결) CLD 를 실험하였으며, 실험결과가 Fig. 7 에 도시되어 있으며 전류제어가 잘 이루어지고 있음이 나타났다.

실험 중 발견된 특징 중의 하나는 비교적 저전류 (35 μ A)에서는 저전압 (2V 이하)에서만 비선형적 특성이 나타나고, 다른 영역에서는 전류제어가 잘 되는 것으로 나타났다. 하지만, 고전류 (2mA 또는 4mA)의 경우는 저전압에서의 전류제어가 불안정한 것으로 실험결과 나타났으며, 175 μ A 소자의 경우 비교적 저 전압이지만 500 μ A CLD 에 비해서 소자의 전류제어가 불안정하였는데, 이는 175 μ A CLD 구성이 35 μ A CLD 5 개를 병렬로 사용하면서 발생한 비선형 특성이라고 판단 된다.

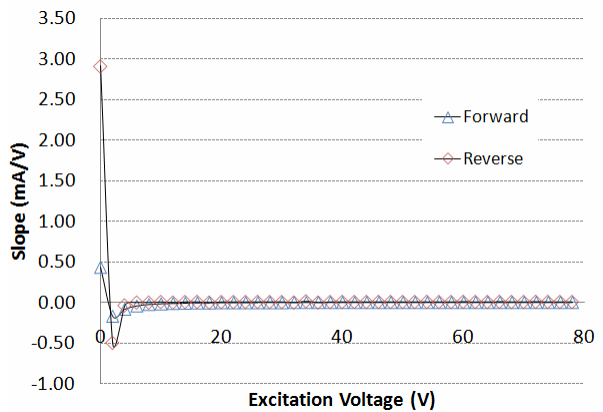
3. 실험의 결과

3.1 간극별 전기방전특성

나노간극 방전시 발생하는 전기신호를 검출하는 회로를 구성하여 전기신호를 통해서 나노간극에서 발생하는 현상을 간접적으로 알아내기 위해서 의



(a)



(b)

Fig. 6 (a) CLD response characteristics for forward and reverse biased voltage (b) slope of current mA/V

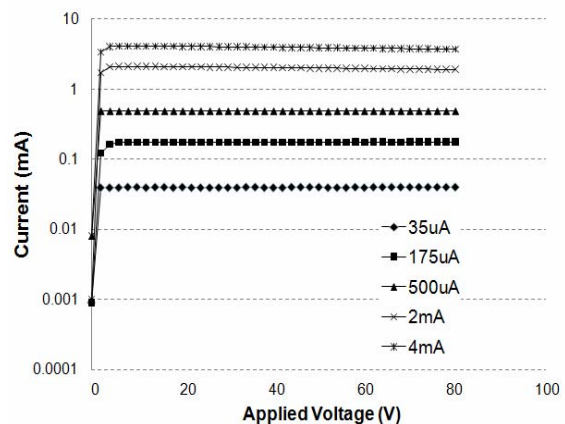


Fig. 7 CLD response characteristics for forward biased voltage with 35 μ A to 4mA CLDs

도적인 쇼트 실험을 시행하였다. 실험결과 Fig. 8 에서 나타난 바와 같이 2mA CLD 와 10V 가한 뒤 쇼트 된 상태에서의 전기신호(간극 30nm)와 쇼트 되지 않은 상태에서의 전기신호(간극 100nm)를

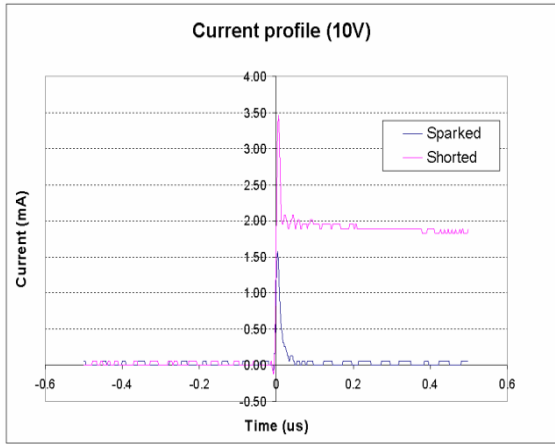


Fig. 8 Current variation of shorted and unshorted (sparked) situation in nano gaps

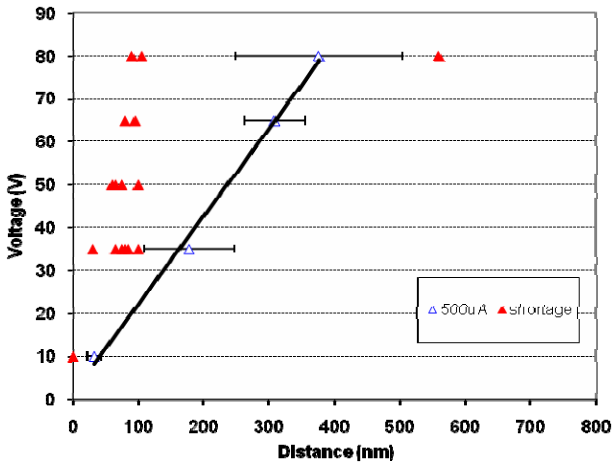


Fig. 9 Spark initiation voltage vs. average gap for 500 μ A regulated current limiting diode

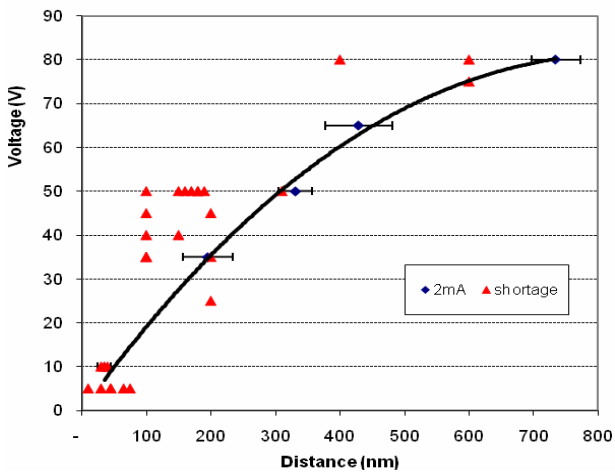


Fig. 10 Spark initiation voltage vs. average gap for 2mA regulated current limiting diode

비교 분석하였다.

실험결과 Fig. 8 에서 나온 결과와 같이 쇼트된

Table 1 discharge time and heat input for CLDs

Diode(μ A)	방전유지시간(μ sec)	Heat input(nJ)
175	2.07	29
500	0.896	36
2000	0.224	36

상태에서는 순간적으로 높은 전류가 흐르다가 수 나노초이내에 정격전류인 2mA 로 제어되는 것을 볼 수가 있었다. 반면 일정 거리(30nm)를 유지한 상태에서 전기를 방전한 상태에서는 순간적인 방전이 일어나고 이후 전류 값이 최저로 되는 것을 볼 수가 있었다.

초기 실험에서 도출 된 결과들을 근거로 하여서 동일시험을 10V 에서 80V 영역에까지 확대하여서 실시를 하였으며, 이때 사용한 CLD 는 500 μ A 이며 이는 회로를 통해서 최대 흐를 수 있는 전류치이다. 실험에서 나타난 결과들을 정리하면 Fig. 9 와 같다.

결과에서 나타난 바와 같이 데이터의 산포가 비교적 크지만 전압에 따른 간극의 관계성이 있음이 확인 되었다. 동일한 실험을 2mA CLD 를 가지고 실험하였으며, 결과가 Fig. 10 에 정리되었다.

실제 방전시간 동안 소입된 에너지 양을 구하기 위해서 방전유지시간을 측정하였고, 80V 전압에서 각각 회로를 통해서 공급된 에너지를 식 (1)과 같이 계산을 하였고, Table 1 에 정리하였다. 또한 175 μ A 이하의 경우 방전시간이 지나치게 길고 방전현상이 불안정하여서 추가적인 실험이 더 필요할 것으로 판단되며 본 논문에서는 계산을 제외 하였다.

$$Q = \int Pdt = \int V \cdot Idt \quad (1)$$

3.2 실험결과분석

나노간극에서 발생하는 전기방전을 이해하기 위해서 가해지는 전압과 흐르는 전류의 양, 전류의 형태, 그리고 전류가 흐르는 시간에 대해서 측정을 하였으며 본 연구논문에서는 특히 인가 되어지는 전압과 제어전류의 양에 대한 방전특성을 아래와 같이 정리할 수 있었다.

3.2.1 간극과 전압과의 관계

Fig. 9 에서 나타난 바와 같이, 일반적으로 전압이 높을수록 비교적 큰 간극에서도 방전이 일어남을 알 수가 있었다. 평균적인 값을 보았을 때 80V 의 경우 250nm 에서 500nm 의 범위에서 전기방전이 일어 남을 볼 수가 있었고, 넓은 표준오차범위를 가지고 있었다. 또한 200nm 이하의 간극을 유

지하였을 때는 방전과 동시에 양극이 쇼트가 일어나는 현상이 발생하였는데, 이는 방전시 발생하는 높은 에너지가 침두를 팽창 및 접합하기 때문일 것으로 분석이 된다.

작은 간극(<200nm)에서의 쇼트가 발생도 있지만, 비교적 큰 간극(> 500nm)에서도 쇼트가 발생하였다. 통계적으로는 작은 간극에서의 쇼트 발생빈도가 높지만, 큰 간극에서의 쇼트발생 빈도도 일부 관찰되었다. 원인으로서는 간극유지의 불안정도 있지만, 간극사에 존재하는 기체의 불균일성도 일부 있고, 무엇보다도 음극으로 쓰였던 Pt-Ir Tip의 반경 즉, 침두의 Sharpness가 큰 영향을 미쳤을 것으로 분석된다. 구체적으로 Sharpness와 Gap의 관계에 대한 체계적 연구는 아직 미시행되었지만, 극단의 경우 ($r=500\text{nm}$ 이상과 $r=200\text{nm}$ 이하)에서 이러한 효과가 일부 확인되었다.

Fig. 10에서 나타난 바와 같이 2mA 전류제어 실험에서, 비교적 중전압인 50V의 경우 100nm에서 350nm 영역에서 전기방전이 발생하는 것으로 관찰되었으며, 쇼트 발생은 100nm 이하에서 발생되었다. 50V의 경우 쇼트 발생영역과 전기방전영역이 일부 겹치는 경우도 발생하였다. 중전압영역의 경우는 80V에 비해서 쇼트와 전기방전의 경계치가 분명하지 않았으며, 통계적으로 50% 정도의 쇼트와 전기방전의 현상이 발생되었다. 이는 전극의 형상이나 전압의 안정성 등이 민감하게 영향을 미치고 있음을 암시하는 것으로 분석된다.

저전압인 10V의 경우 전기방전과 쇼트가 간극에 거의 영향을 받지 않고 무작위로 발생하는 것으로 관찰이 되었다. 10V의 경우는 발생현상이 대부분 전극간격 50nm 이하이고 이는 전극 Tip 반경의 1/10에서 1/4에 해당하는 극히 작은 영역이다. 이러한 극미세 영역에서는 외부온도에 의한 Tip의 열팽창이 실험에 영향을 줄 수 있는 수준이며 시스템의 다른 불안정한 요인들이 결과에 영향을 미쳤을 것으로 분석된다.

실제로 백금의 열팽창계수 $\alpha_{\text{Pt}}=8.8\mu\text{m} / \text{m K}$ 이고 이리듐의 열팽창계수가 $\alpha_{\text{Ir}}=6.4\mu\text{m} / \text{m K}$ 임을 감안하고, 구성비가 80:20인 전극 Tip일 경우 1도의 온도가 변화시 5mm Tip의 누적팽창량은 약 41.6nm에 달한다. 실제 온도의 변화는 이보다 훨씬 적게 유지가 되지만 Tip이 장착되어 있는 substrate나 하부의 양극 금박의 팽창률도 감안하면 50nm의 간극 또한 민감한 영역이 될 수 있다.

3.2.2 간극과 전류의 관계

인가되는 전압과 더불어서 회로에 흐르는 전류의

양도 전기방전에 많은 영향을 미치는 것으로 분석이 되었다. 그 예로서 회로에 흐르는 전류의 양이 150 μA 일 때와 2mA일 때를 비교하였다. Fig. 9에서 나타난 바와 같이 500 μA 로 전류량을 제어했을 경우와 Fig. 10의 2mA로 전류량을 제어한 경우를 비교해 보면 그 차이가 확연히 들어나게 된다. 대표적인 경우로 80V를 보았을 때 150 μA 전류제어의 경우 평균 간극은 376nm이고 표준편차는 128nm 영역이었다. 다시 말해서 248nm에서 504nm 영역에 걸쳐서 전기방전이 안정적으로 일어났다.

반면 2mA의 경우는 평균 간극이 734nm이고 표준편차는 38nm로 측정되었다. 이는 150 μA 에 비해서 평균치는 약 2배 정도가 증가하였고, 표준편차는 약 1/3 수준으로 감소가 되었다.

평균치 증가는 전류의 흐름이 커짐으로 인해서 전기방전이 안정적으로 발생하여서 외부교란 즉 간극에 분포하는 공기나 온도변화 및 전극의 반경에 비교적 둔감하기 때문일 것으로 분석되고, 표준편차감소의 원인도 전기방전 메커니즘의 안정성 향상으로 인한 이유일 것으로 분석이 된다.

간극과 전류의 관계를 알아보기 위해서 추가 실험이 35 μA 와 175 μA 에 대해서 시행되었으나, 500 μA 의 현상과 큰 차이를 보이지 않았고 다만, 데이터의 산포도가 더 크게 보였다. 또한 175 μA CLD의 경우 단일 소자 구매가 어려워 35 μA CLD 5개를 병렬하였는데, 일부 비선형성에 기인한 오차도 있을 것으로 고찰된다.

4. 결론

나노간극으로 유지된 상태에서 양단에 전압을 가하여 전기방전에 대한 실험을 수행하였다. 사용된 전극은 음극 80Pt-20Ir의 성분으로 하여 끝부분이 수백 nm의 반경을 가지는 첨단전극으로 구성하였으며, 양극은 200 μm 두께의 절연 유리판 위에 100nm 두께의 금박을 코팅한 서브스트레이트가 사용되었다.

실험의 결과로서 전기방전은 비교적 고전압(~80V)과 고전류(~2mA)에서 안정된 형태의 방전이 관찰되었다. 고전류 고전압에서의 방전은 비교적 큰 간극인 마이크로미터 급에서의 방전이 발생하였고 데이터의 산포도 작아서 매우 안정적인 전기방전이 관찰되었다.

반면, 고전압이라 하더라도 저전류영역인(~500 μA)에서는 약 300nm 영역의 간극에서 방전이 되었으나 방전데이터의 산포도가 비교적 컸다. 저전압(~10V)

의 영역에서도 전기방전이 관찰되었으나, 쇼트와 방전의 데이터가 혼합되는 경우가 많았으며 전기방전의 안정성이 매우 떨어졌다.

실험에서 관찰된 내용은 MEMS 디바이스나 반도체 공정에서 고전류가 응용되는 전자칩의 안정성을 테스트 하기 위한 중요한 기초연구가 될 것으로 기대가 된다. 실험에 사용된 백금 전극의 첨단부의 에칭이 좀더 균일화(예, SPM Tip)될 수 있으면, 전기방전의 안정성이 좀더 높아 질 것으로 기대가 된다. 백금 전극의 곡률반경이 더 작아지면 더 미세한 전기방전 제어가 될 것으로 기대가 되고 더 집적된 형태의 전자부품설계 및 제작연구에 도움이 될 것으로 기대된다.

실험에 나타난 결과에서 안정된 방전을 얻을 수 있는 조건들을 알 수가 있었다. 안정되게 방전되는 효과는 미세용접이나 접합에 응용될 수 있으며, 반대로 방전되는 환경을 이해하여 방전되지 않는 조건으로 회로가 설계되면 MEMS 기기 등의 안정성을 기하는데 도움이 될 것으로 기대가 된다.

본 실험에서 다양한 Tip 제작에 따른 어려움으로 인해서 제한된 변수 내에서 실험을 수행하였다. 향후 Tip 반경에 따른 전기방전의 현상에 대해서 추가 연구가 실시 되어야 할 것이고, 외부환경에 따른 추가연구 즉, 열팽창이나 두 전극사이에 분

포하는 원자의 구성에 따른 영향도 추가적으로 연구되어야 하겠다.

참고문헌

- (1) Slade, P.G. and Taylor, E.D., 2002, "Electrical Breakdown in Atmospheric Air Between Closely Spaced (0.μm-40μm) Electrical Contacts," *IEEE Trans. Compon. Packaging Technol.*, Vol. 25, No. 3, pp. 390~396.
- (2) Purcell, S.T., Binh, V.T. and Thevenard, P., 2001, "Atomic-Size Metal Ion Sources: Principles and Use," *Nanotechnology*, Vol. 12, 168~172
- (3) Walrave, J. A., Soden, J. M., Tanner, D. M., Tadngyonyong, P. Cole, E., Anderson, R. and Irwin, L., 2003, "Electrostatic Discharge/Electrical Overstress Susceptibility in MEMS: a New Failure Mode," *Proc. SPIE*, Vol. 4180, p. 30
- (4) Dickrell, D. J. and Dugger, M. T., 2005, "The Effects of Surface Contamination on Resistance Degradation of Hot-Switched Low-Force MEMS," *Proc. of the 5th IEEE Holm conference*, Vol. 26-28, pp. 255~258
- (5) Farson, D., Choi, H. and Rokhlin, S., 2006, "Electrical Discharges Between Platinum Nanoprobe Tips and Gold Films at Nanometer Gap Lengths," *Nanotechnology*, Vol. 17, pp. 132 ~139.