2004년도 대한전기학회 전기물성·응용부문회 추계학술대회 논문집 (2004.11.5-11.6)

미소간극을 갖는 MEMS 방전 소자 제작 및 특성 연구

김주환, 문형식, 김영민
홍익대학교 전기정보제어공학과

A Novel discharging MEMS device & glow discharge properties

Joohwan Kim, Hyoungsik Moon, Youngmin Kim
Dept. of Electrical, Information and Control Engineering, Hongik University

Abstract - A micro-scale discharge device has been fabricated using MEMS technology and failure mechanisms during DC discharge are investigated for the microstructure. The failure of sustaining the plasma is mainly caused by either open or short of the micro-electrodes, both resulting from the sputtered metal atoms during the DC discharge. The glow discharge lifetime of the microstructures is found to depend on bias circuit scheme as well as the electrode structure. Based on the understanding of the failure mechanism, a novel microstructure is suggested to improve discharge lifetime and the longer lifetime is experimentally demonstrated. In addition to the failure mechanism, an electric breakdown between two electrodes with microns gap are studied using micromachined metal structures. The electrode gap is able to be accurately controlled by thickness of a sacrificial layer and the electric breakdown was measured while varying the gap from 2 μm to 20 μm. The electric breakdown behavior was found to highly depend on the electrode material, which was not considered in Paschen's law.

1. 서 론

최근 플라즈마 기술은 반도체 및 유기소자의 세척 및 표면처리, 코팅뿐만 아니라 디스플레이의 광원 및 환경 분야에 걸쳐 다양하게 응용되고 있다. 특히 환경산업에 있어 저온처리 기술로 오존발생, 유해가스 저감, 살균소독 등 환경 분야로의 플라즈마 응용이 크게 기대되고 있다. 하지만 기존의 플라즈마 장비의 큰 부피와 고전력, 고비용은 플라즈마 기술의 상용화에 있어 극복되어야 할 문제점으로 지적되어 왔다. 이러한 기술, 경제적 문제점을 해결하기 위해 최근 MEMS 기술을 이용한 플라즈마 응용 소자가 연구되어 발표되었다[1-4]. MEMS 기술을 이용하여 소자 간극 거리를 마이크로 단위로 감소시켜 낮은 방전 전압에서 플라즈마를 형성시킬 수 있었으며, MEMS 기술의 탁월한 집적 기술로 소자의 크기 또한 크게 줄어들 수 있는 장점이 있다. 하지만 MEMS 기술을 이용한 플라즈마 소자 제작 기술은 아직 초보적인 단계로, 안정적인 플라즈마 형성은 극히 제한적으로 이루어져 왔다. 유전체 기판 위 금속선에서의 DC 플라즈마는 방전 효율이 떨어지고 높은 방전 전압을 갖는 단점이 있고 유리기판을 식각시킨 free standing구조의 DC 플라즈마 방식은 개선된 방전 효율과 400V의 방전 전압을 갖지만 방전 중 증착된 전극이 빨리 스퍼터링(sputtering) 됨으로 제한된 방전 시간을 갖는 단점이 있다[2,4]. 따라서 높은 방전 효율과 저전압 구동값을 갖는 소자의 연구, 개발이 필요하고 방전 소자의 수명을 늘리는데 있어 방전 전류량 조절 및 전극 구조의 개선이 요구 되고 있다. 본 연구에서는 전극 모양에 따른 전기장의 형태를 시뮬레이션 하였고 높은 방전 효율을 갖고 긴 방전 유지 시간을 위한 3-D 구조의 MEMS 소자를 제작하였다. DC 전압으로 대기압 하에서 방전을 일으켜 관측하였고 두 전극의 거리를 줄여주면서 방전 전압을 측정, Paschen's law와 비교 하였다.

2. 본 론

2.1 소자 제작공정

다음의 그림 1 은 미소 간극 방전 소자 제작공정을 나타내는 공정도이다. 기판으로는 공기 중으로 방전이 일어나기 전 전극 간에 일어날 수 있는 절연파괴를 막기 위해 높은 Dielectric strength 값을 갖는 Glass를 사용한다. 500Å/1500Å 두께로 Ti/Cu를 열증착 한 후 니켈 도금을 위한 mold를 Photoresist로 패터닝 한다. 본 제작 과정에서 Photoresist의 두께는 방전이 일어나는 두 전극 사이의 거리를 결정하게 된다. 니켈 전기도금을 하여 삼차원 전극을 구성하는데, 방전 효율을 높이기 위한 충분한 수평 거리를 확보하기 위해 over plating을 해준다. 전극의 수평 거리는 over plating 하는 시간으로 결정이 된다. PR을 없애고 Ti/Cu layer를 식각 시킨다. 기판위의 평면 전극이 될 재료를 열증착 하여 완성한다. 이 때에 수평으로 뻗어있는 삼차원 전극으로 인해 self align 된 평면 전극이 전극 증착시 형성된다.

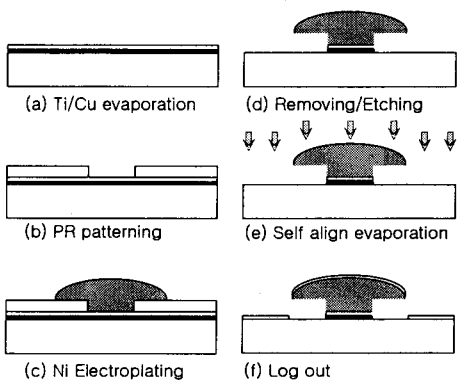


그림 1. 미소 간극 방전 소자의 공정도

2.2 방전 소자의 구조

그림 2에는 실제 제작된 소자의 전극을 나타내었다. 삼차원으로 떠있는 전극과 바닥 전극과의 구조는 line대 plane의 구조이고 두 전극에 전압이 가해졌을 시 생기는 전계를 simulation 하였다. 그림 3에 전극간 수직, 수평

거리가 7 μm, 24 μm로 되어 있는 구조의 전계 simulation을 나타내었다. 그 결과 떠있는 전극의 수평거리가 충분히 확보되어 두 전극의 끝 부분에서 수직방향으로 대부분의 전계가 형성 되는 것을 알았고 수평 방향으로는 전계의 양이 적고 기판을 통한 절연파괴의 가능성이 적음을 확인 하였다.

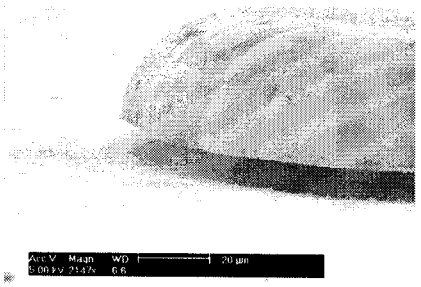


그림 2. 제작된 방전 소자

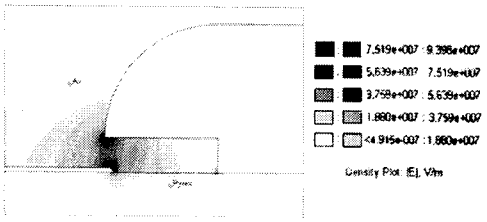


그림 3. 두 전극에 걸리는 전계 분포

2.3 실험 및 결과

방전 실험은 대기압의 공기 중에서 이루어졌고 DC전압을 걸어 형성 시켰다. 소자에 Ballast Resistor를 직렬로 연결하여 저항에 걸리는 전압을 Oscilloscope로 측정, 방전 전류량을 알 수 있었고 100KΩ-10MΩ 사이로 저항 값을 조정 해줌으로 흐르는 전류량을 조절 할 수 있었다. 방전이 시작되는 Breakdown voltage 값은 전원의 전압이 증가할 때 증가하는 방전 전류량, I_D 과 전극 사이에 걸리는 전압, V_G 의 변화로 알 수 있다. 그림 4는 전극간 거리가 5 μm인 소자에서의 전류, 전압 특성 곡선이다. 전원에서 전압을 증가시켜주면서 전류량을 측정한 결과 방전 전류가 흐르기 시작하는 320V 가 Breakdown voltage 임을 알 수 있다. 또한 계속해서 전원의 전압을 증가시켜주면 보다 많은 방전 전류가 흐르게 되고 전극 사이의 전압 값은 점차 떨어져 글로우 플라즈마 (glow plasma)로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

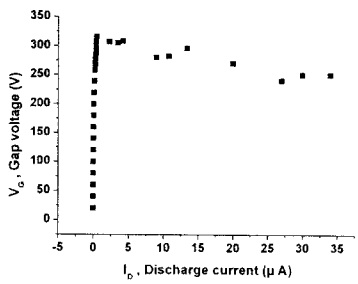


그림 4. 미소간극에서 DC 방전 I - V 특성 곡선

2.3.1 Paschen's Law와 미소간극의 방전 특성

MEMS 기술을 이용하여 방전 전극의 거리를 마이크로 단위로 조절이 용이하게 됨에 따라 기존의 방전 이론과 비교를 해보았다. 기존의 Paschen의 이론에 의하면 방전전압은 식 (1)과 같이 압력 p, 전극간 거리 d 와 함수관계에 있다. 여기서 C_1, C_2는 기체 종류에 따라 변하는 상수이다.

$$V_b = \frac{C_1(p \cdot d)}{C_2 + ln(p \cdot d)} \quad (1)$$

그러나 최근 들어 이론과 다른 결과들이 연구된 바 있다 [5][6]. 본 연구에서는 전극 간격이 매우 균일한 전극을 이용하여 미소 간극의 방전실험을 하였다. 대기압의 공기 중에서 실험을 한 결과 4 μm 이상의 간극에서는 paschen 이론과 일치하였지만 4 μm 이하의 간극에서는 이론과는 달리 훨씬 낮은 전압에서 방전이 일어남을 관찰할 수 있었다. 또한 음극으로 쓰인 전극의 재료에 따라 방전 전압 값에 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 그림 5는 각 음극의 재료와 전극 간 거리에 따른 방전 전압의 실험값을 나타내었다.

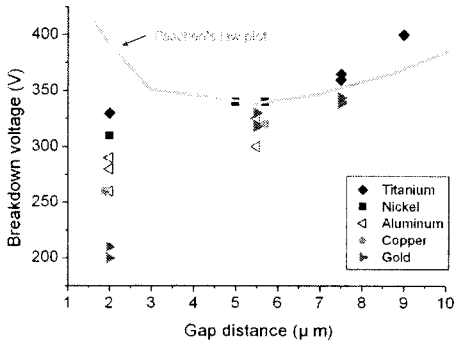
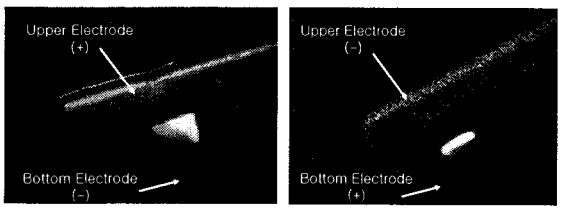


그림 5. 대기압 공기 중 전극간 거리와 Breakdown voltage

2.3.2 마이크로 소자 구조와 방전 유지 시간

유전물질을 이용한 RF방전이 아닌 DC 방전에 있어서는 방전 형성 시 이온들이 음극에 충돌하여 일어나는 스퍼터링 (sputtering) 현상으로 전극이 파괴되는 문제점이 있다. 이러한 현상은 압력을 조절하고 방전 전류를 줄여줌으로서 어느 정도의 보완은 되지만 대기압 하에서의 응용에는 적용시킬 수 없고 방전 효율에 있어서도 문제가 된다. 따라서 본 연구에서는 소자의 구조를 변화 시키면서 방전 유지 시간과의 관계를 고찰하였다. 본 소자에서는 열 증착된 금속박막이 바닥의 평면 전극으로 사용되었다. 바닥 전극을 음극으로 사용했을 시, Positive 방전이 되어 음극이 쉽게 스퍼터링(sputtering)된다. Positive방전은 플라즈마의 부피는 증가하나 Negative방전에 비하여 이동성이 심해 불안정한 경향을 띤다. 그림 6은 두 Bias scheme에 따른 플라즈마 형태이다.



(a) Positive 방전 (b) Negative 방전

그림 6. Bias scheme에 따른 플라즈마의 형태

Negative 방전이 보다 더 높은 전력 값으로 안정된 방전이 유지 되었다. 그림 7은 각 형식의 방전 시, 시간에 따른 전극간의 소모되는 Power를 나타내었다. 실험에서 사용된 소자에 필요한 방전 유지 전압은 370 V이고

Power는 V_G과 I_D의 곱으로 구할 수 있다. Upper electrode가 음극인 Negative 방전은 Positive 방전에 비하여 도금된 전극이 스퍼터링으로 쉽게 파괴 되지 않아 오랫동안 안정된 방전을 유지하였다. 하지만 Negative 방전 또한 Arc 방전과 같은 급격한 전류의 쏠림으로 바닥 전극이 파괴되었다.

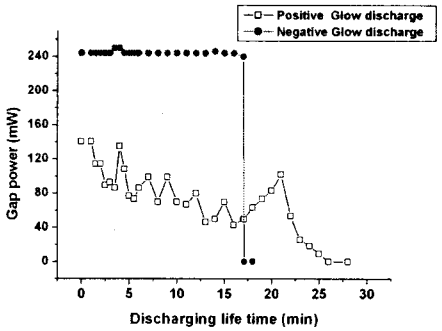


그림 7. Discharging time dependency on Bias scheme

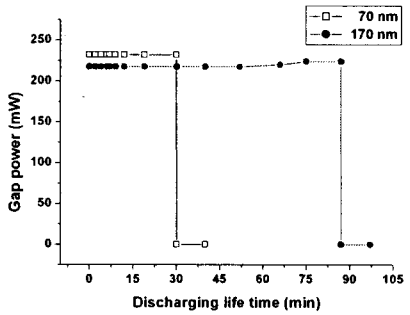


그림 8. Discharging time dependency on thickness of bottom electrode (Negative type)

바닥 전극으로 증착된 구리의 두께에 따른 방전 유지 시간을 그림 8에 나타내었다.

증착된 바닥전극은 얇은 두께로 인해 방전 시간의 한계를 가진다. 이 문제를 보완하기 위해 바닥 전극 또한 Ni 도금을 해준 후 실험, 측정하였다. 방전 failure의 원인을 분석한 결과 도금된 전극은 sputtering된 Ni이 두 전극을 잇는 단락이 주된 원인 이었다. 따라서 두 전극 사이의 기판 위에 SOG (spin on glass)를 2 μm의 두께로 코팅하여 두 전극의 단락을 방지하고자 하였다.

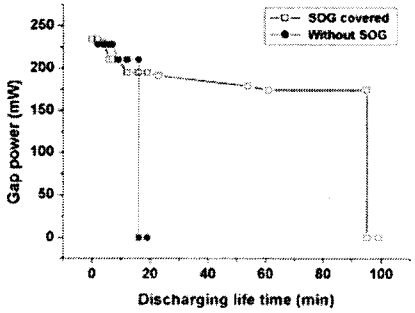


그림 9. Discharging time dependency on patterned SOG coating.

코팅된 SOG는 바닥전극의 모서리 부분에 강하게 걸리는 전계를 줄여 균일한 전계 유지에 도움이 되고 두 전극간의 단락이 되기까지 시간을 늘려주는 역할을 하였다. 그림 9는 SOG의 유무에 따른 방전시간 관계를 나타내었고 그림 10은 SOG가 Pattern된 소자에서 일어나는 방전 모습이다.

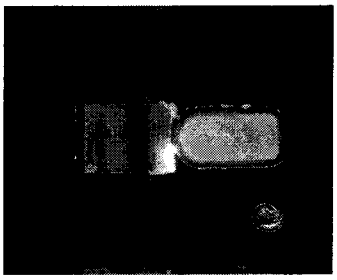


그림 10. SOG patterned discharging device

3. 결 론

본 연구에서는 self-aligned된 삼차원 방전 소자를 제작하여 대기압의 공기 중 방전 실험을 통해 저전압에서 안정된 글로우 플라즈마를 실현해보였다. MEMS 기술을 이용하여 매우 균일한 간극 거리를 갖는 마이크로 삼차원 전극이 제작되었으며, 여러 가지 금속 전극을 사용하여 미소간극의 방전전압이 기존의 Paschen 이론값과는 달리 전극 물질에 따라 변화함을 알 수 있었다. 또한 마이크로 방전 소자를 이용한 방전시 글로우 플라즈마 유지 시간이 전극 sputtering에 의해 제한되는 현상을 계량화하여 failure mechanism을 이해하였으며 이를 바탕으로 방전 유지 시간을 향상시킬 수 있는 마이크로 방전 소자 구조가 제안되었다. 이밖에도 전극의 구조에 따른 적절한 전압 방향, 전극 두께의 증가, 단락을 막기 위한 절연체 코팅과 같은 방법으로 방전 시간을 증가 시킬 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력기술기초연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] L. Baars-Hibbe, et al, "Micro-structured electrode arrays: atmospheric pressure plasma processes and applications", Surface and coatings Technology, 174-175, 519-523, 2003.

[2] Jan C. T. Eijkel, et al, "An atmospheric pressure dc glow discharge on a microchip and its application as a molecular emission detector", J. Anal. At. Spectrom,15, 297-300, 2000.

[3] Jon K. Evju, "Atmospheric pressure microplasmas for modifying sealed microfluidic devices", Applied Physics Letters, 84, n10, 2004.

[4] Ralf G. Longwitz, et al, "Study of Micro Glow Discharges as Ion Sources" , 29th EPS Conference on plasma phys. and Contr. Fusion Montreux, ECA, 26B, P-2.026, 2002.

[5] J-M Torres, R S Dhariwal, "Electric field breakdown at micrometre separations", Nanotechnology, 10, 102-107, 1999.

[6] Takahito Ono, et al, "Micro-discharge and electric breakdown in a micro-gap", J.Micromech.Microeng, 10, 445-451, 2000.