

대기압 플라즈마 발생시 인가전압의 상승시간에 따른 영향

論 文

57-7-15

Effect of Rise Time of a Pulse Bias Voltage on Atmospheric Plasma Generation

金載赫* · 陳相逸** · 金榮珉†
(Jae-Hyeok Kim · Sang-II Jin · Young-Min Kim)

Abstract - We investigate the effect of rise time of a pulse bias voltage on atmospheric plasma generation. With the faster rise time of the pulse bias, the glow discharge appears to be more uniformly generated along the electrodes. I-V measurement confirms that higher loading power can be obtained using the faster rise time. A new understanding for atmospheric plasma generation at a micro-gap electrode is suggested.

Key Words : MEMS, Electroplating, Self-aligned, Discharge, Plasma

1. 서 론

진공 장비가 요구되지 않는 대기압 플라즈마의 다양한 잠재 응용 분야, 예로써 반도체 공정 표면처리, 광원 및 환경 분야, 로 인해 대기압 플라즈마 발생 기법에 관한 연구가 최근 활발히 이루어져 오고 있다. 하지만 대기압 플라즈마 발생 시 요구되는 고전압 전원장비 및 장비크기로 인해 제한된 영역에서 초보적인 상용화가 이루어 왔다. 이런 문제점을 해결 하기위해 마이크로 구조의 전극을 이용하여 저전압에서 플라즈마를 발생 시키는 연구가 발표되었으며 [1][2][3], 발표된 소자 중, 자가 정렬(self-aligned) 공정 기법으로 제작된 마이크로 트라이오드 (Micro triode)[4]는 250 V 전압에서 안정적인 대기압 플라즈마를 성공적으로 발생 시키기도 하였다. 하지만 상용화에 필요한 2차원 플라즈마 소스를 구현하기 위해서는 마이크로 전극 어레이 칩을 이용한 대기압 플라즈마 발생이 요구되나, 어레이 칩을 이용한 플라즈마 발생 시 전 영역에서 플라즈마가 형성되지 않고 국소적으로 형성되는 문제점이 아직 해결되지 않고 있다. 대기압 플라즈마를 발생 시 플라즈마 형성에 미치는 요인은 펄스의 전압, 펄스의 상승시간, 펄스의 주파수, 가스의 압력, 가스의 종류 등 다양한 원인이 있다고 알려져 있다[5]. 본 연구에서는 앞서 문제점으로 지적된 플라즈마 형성이 제한된 영역에서 일어나는 현상을 해결할 수 있는 방법으로 플라즈마 발생 시 사용되는 펄스 전압의 상승 시간과 플라즈마 형성간의 상관관계를 실험적으로 규명하고, 또한 상관관계의 원인을 설명할 수 있는 물리적 해석을 제안하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 제시

2.1 기존 이론

기존의 선행 연구에서는 인가전압의 상승시간이 늦어질수록 대기압에서 플라즈마가 더 균일하게 발생된다고 보고한 바 있다.[6][7] 이 때 사용된 전극 간의 거리는 수 밀리미터 혹은 수백 마이크로미터 정도로 두 전극 간 전기장에 의해 전자 집단(avalanche head)이 형성되어 전기적 방전이 유지되며, 인가전압의 상승시간이 늦어질수록 전자 집단이 전극 간 전계에 의해 양전극에 도달하는 시간이 길어지게 된다. 전자 집단의 이동 시간 동안 전자 집단내의 전자들 사이의 척력과 확산(diffusion)으로 인해 전자 집단 영역이 전계와 수직 방향으로 확장된다. 그 결과 인접한 전자 집단은 서로 겹쳐져 균일한 분포를 띄게 되며, 전자 집단과 양극 사이에 형성되는 전계의 수평적 변화(lateral gradient)가 좀 더 일정한 분포를 가지게 되어 균일한 플라즈마가 형성된다. 즉 인가전압의 상승시간이 느릴수록 전자 집단 내 전자들의 확장이 용이해져 플라즈마의 균일도가 좋아지게 된다는 것이다.

2.2 마이크로 전극을 위해 제시된 이론

본 논문에서 제작된 소자는 수 마이크로 정도의 전극 간 간격을 갖고 있으며, 이러한 좁은 전극 간격으로 인해 전자 집단(avalanche head)의 크기가 제한될 것으로 기대된다. Levatter et.al[6]는 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 대기압 방전 시 전자 집단이 성장하여 서로 겹쳐지기 위해서는 최소 수십 마이크로미터의 간격이 필요함을 보였다. 따라서 수 마이크로 전극 간격에서는, 사태현상을 유발시키는 전자들이 집단을 이루기 전에 양전극에 도달하게 되며 이로 인해 앞서 언급한 전자 집단의 겹침 현상과 균일도간의 관계를 적용할 수 없게 된다. 대신 이온들의 개별적인 동작 특성이

† 교신저자, 正會員 : 弘益大 工大 電子電氣工學部 副教授
E-mail : ymkim@hongik.ac.kr

* 正會員 : 弘益大 大學院 電氣情報制御工學科 碩士課程

** 學生會員 : 弘益大 大學院 電氣情報制御工學科 碩士課程

接受日字 : 2007年 12月 7日

最終完了 : 2008年 3月 27日

중요해지는데 수 마이크로 단위의 전극 간격에서 플라즈마 생성에 기여하는 중요한 요인은 외부전계로 인해 생기는 전자의 운동에너지이다. 최초 음극에서 출발한 전자는 외부전계로 인한 가속을 받아 Ar 원자와 충돌하여 Ar 원자를 이온화 시키고 충돌한 전자 자신은 운동에너지를 대부분 상실하게 된다. 이러한 운동에너지를 상실한 전자와 이온화로 인해 생성된 전자는 다시 가속을 받아 운동에너지를 가지게 되는데, 이 때 얼마나 빨리 다른 Ar 원자를 이온화 시킬 수 있는 운동에너지를 가지느냐에 따라 플라즈마의 균일도가 결정 된다. 이러한 관점에서 인가전압의 상승시간은 중요한 역할을 한다.

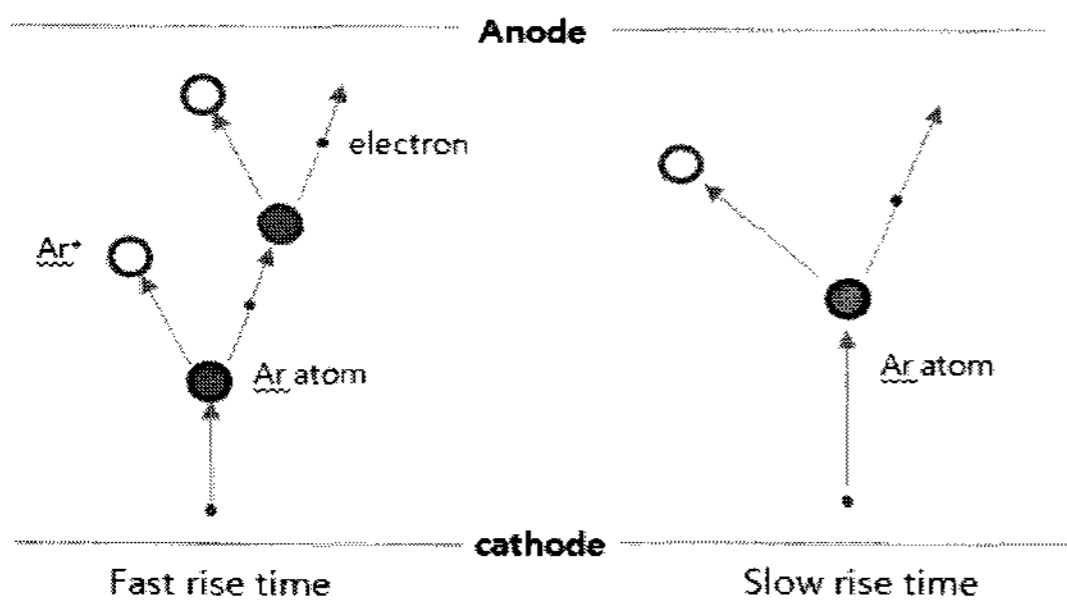


그림 1 상승시간에 따른 플라즈마 형성 메커니즘

Fig. 1 Formation mechanism of atmospheric plasma for different rise time.

이와 같은 인가전압 상승시간에 따른 플라즈마 형성 메커니즘은 그림 1에서 표현되었다. 인가전압이 빠르게 상승할수록 음극에서 출발한 전자가 Ar 원자와 최초로 충돌한 다음에 이 전자는 다시 인가전압에 의해 양극 쪽으로 가속을 받게 된다. 그리고 이때, 충돌이후 외부 전계가 지속적으로 빠른 속도로 증가하기 때문에 가속은 최초의 충돌까지 받은 가속보다 더 큰 힘으로 가속 되게 된다. 이러한 가속으로 인해 전자는 다시 빠른 시간 내에 Ar 원자를 이온화시킬 수 있을 정도의 에너지가 생기고 그 이후 다른 Ar 원자와 충돌하여 추가적인 이온화 과정을 만들어 낸다.[8] 이러한 사태현상(avalanche phenomenon)으로 인해 생성된 Ar 이온들은 이온간의 척력에 의해 전극방향으로 퍼져 나가게 되며 이를 통해 플라즈마가 전극을 따라 균일하게 형성하게 된다.

전자 운동에너지로 인한 이온화 과정 메커니즘과 더불어 수 마이크로 간격에서 중요하게 다루어야 될 또 다른 전자 생성 메커니즘으로 가속된 전자로 인해 유기되는 양극에서의 이차 전자 방출이다.[9] 전계로 인해 가속된 전자와 양전극간의 충돌로 방출된 이차 전자는 인가된 전계에 의해 다시 양극 쪽으로 재 가속되어 이동하게 되는데 이 과정에서 충분한 이온화 에너지를 가지게 되었을 때 Ar 원자의 이온화에 기여하게 된다. 이 현상은 마이크로(micro) 및 매크로(macro) 전극 모든 경우에서 발생하지만 매크로 전극 간 이온화된 Ar 및 전자의 수에 비해 마이크로 전극 간 이온화된 Ar 및 전자의 수는 매우 적게 되므로, 양전극 부근에서 발생하는 이차 전자 방출이 플라즈마 균일도에 대해 미치는 영향은 마이크로 전극 소자에서 더 커지게 될 것으로 예측된다. 마이크로 전극 간 플라즈마 발생 시 양극과 전자와

의 충돌로 인해 발생하는 이차 전자의 수는 충돌 시 전자의 운동에너지에 비례하여 증가하므로, 인가전압이 빠르게 상승할수록 전자는 더 큰 운동에너지를 가지게 되고 이로 인해 더 많은 수의 이차 전자가 발생하게 된다. 이러한 이차 전자 방출로 마이크로 전극에서의 이온화 과정이 활성화 되고 보다 균일한 플라즈마를 발생할 것으로 기대할 수 있다. 이와 같은 고찰을 통해 매크로 전극과 마이크로 전극에서의 플라즈마 균일도를 결정하는 주요 요인이 서로 다를 수 있게 되었으며, 매크로 전극에서와는 다르게 마이크로 전극에서는 인가전압이 빠르게 상승할 때 대기압 플라즈마가 균일하고 안정적으로 발생할 수 있는 이론적 배경을 제시하였다.

3. 마이크로 플라즈마 발생 소자

본 연구에서 사용된 마이크로 방전 소자는 양전극 과 제1 음전극, 제 2음전극으로 구성되어 있으며 전극의 길이는 5 mm이다(그림 2). 자세한 제작 방법은 발표된 논문 [4]에 나와 있다. 그림 3은 실제 제작된 소자의 SEM 사진으로 양전극과 제 1음전극이 균일하게 자가 정렬(Self-align) 된 것을 확인할 수 있으며 양전극과 제 1 음전극 간 거리는 5 μm이다.

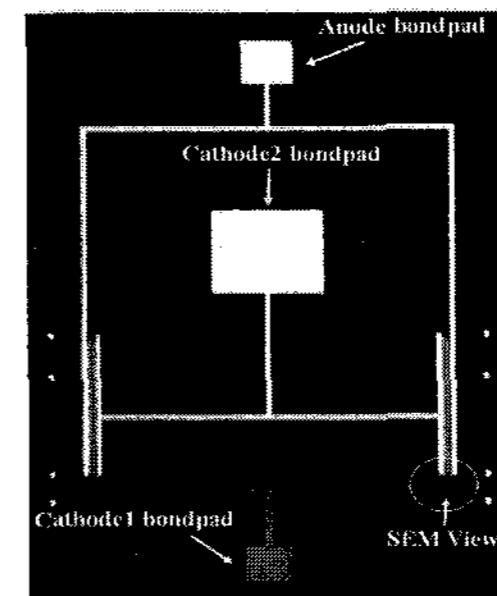


그림 2 마이크로 플라즈마 소자.
Fig. 2 Layout of Plasma MEMS device.

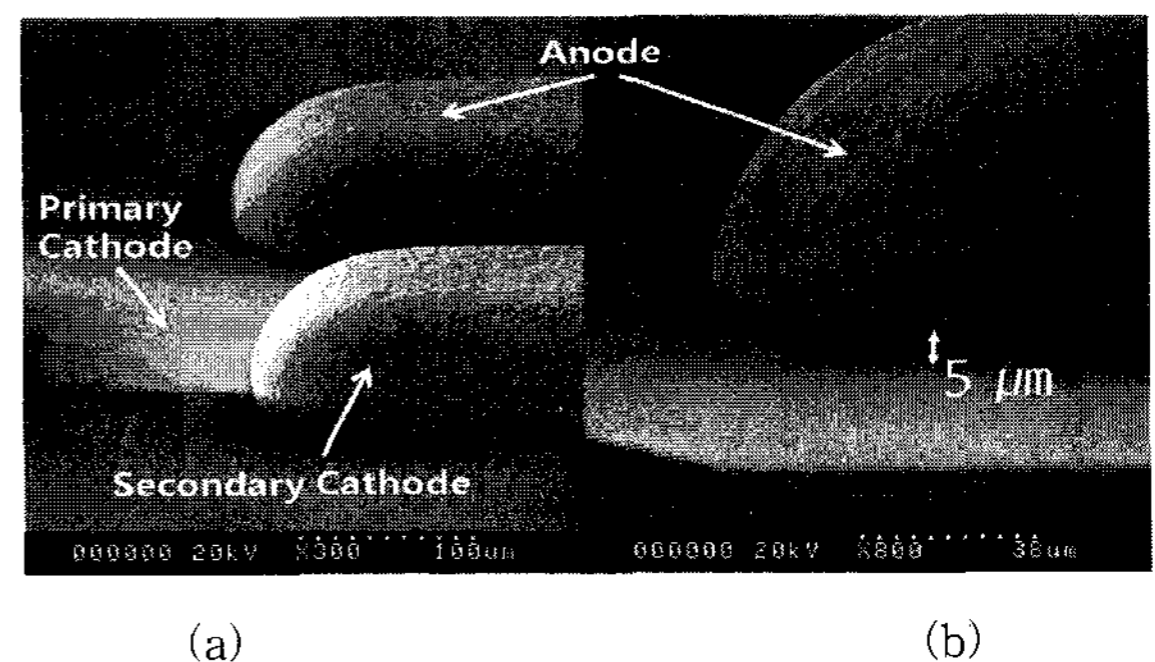


그림 3 완성된 소자의 SEM 사진. (a) 제작된 소자의 측면 사진 (b) 자가 정렬 된 5 μm 간격의 전극
Fig. 3 SEM images of electrodes. (a) Side view of electrodes (b) 5 μm Gap between anode and primary cathode.

4. 플라즈마 발생 측정 실험 및 결과

방전 실험 시 사용한 회로도에는 그림 4에 나타나 있으며 플라즈마 발생 시 필요한 펄스 전압의 상승시간은 100 ns에서 800 ns까지 변화시켜 플라즈마 발생 실험을 수행하였다.

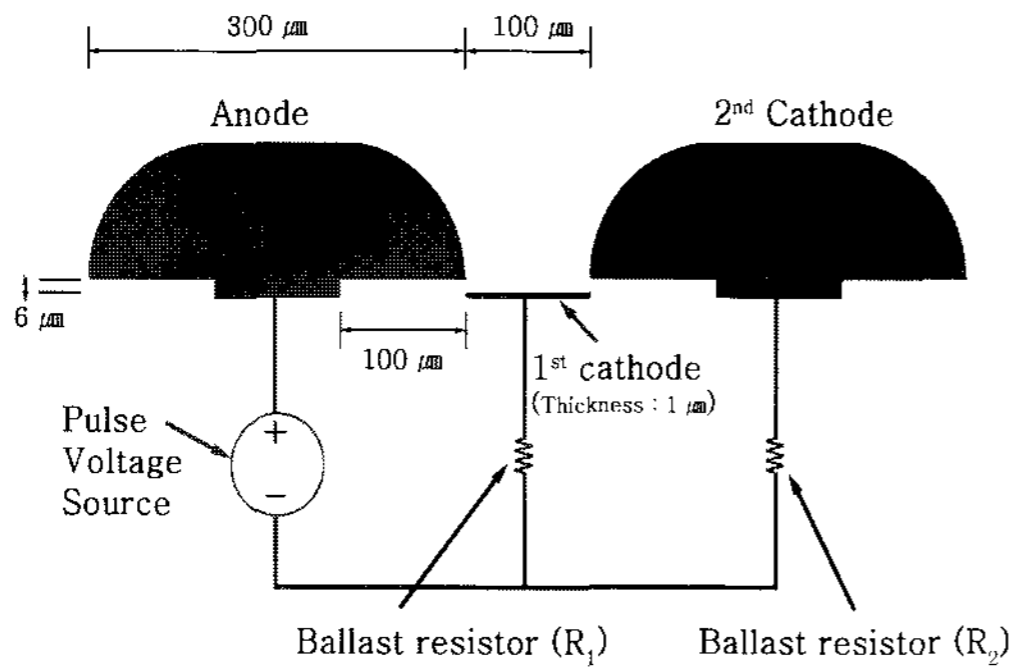


그림 4 플라즈마 발생 회로. 150 KHz의 주파수를 갖는 펄스 전압이 사용되었음.

Fig. 4 Schematic of test setup for plasma generation. A 150 KHz pulsed voltage is applied.

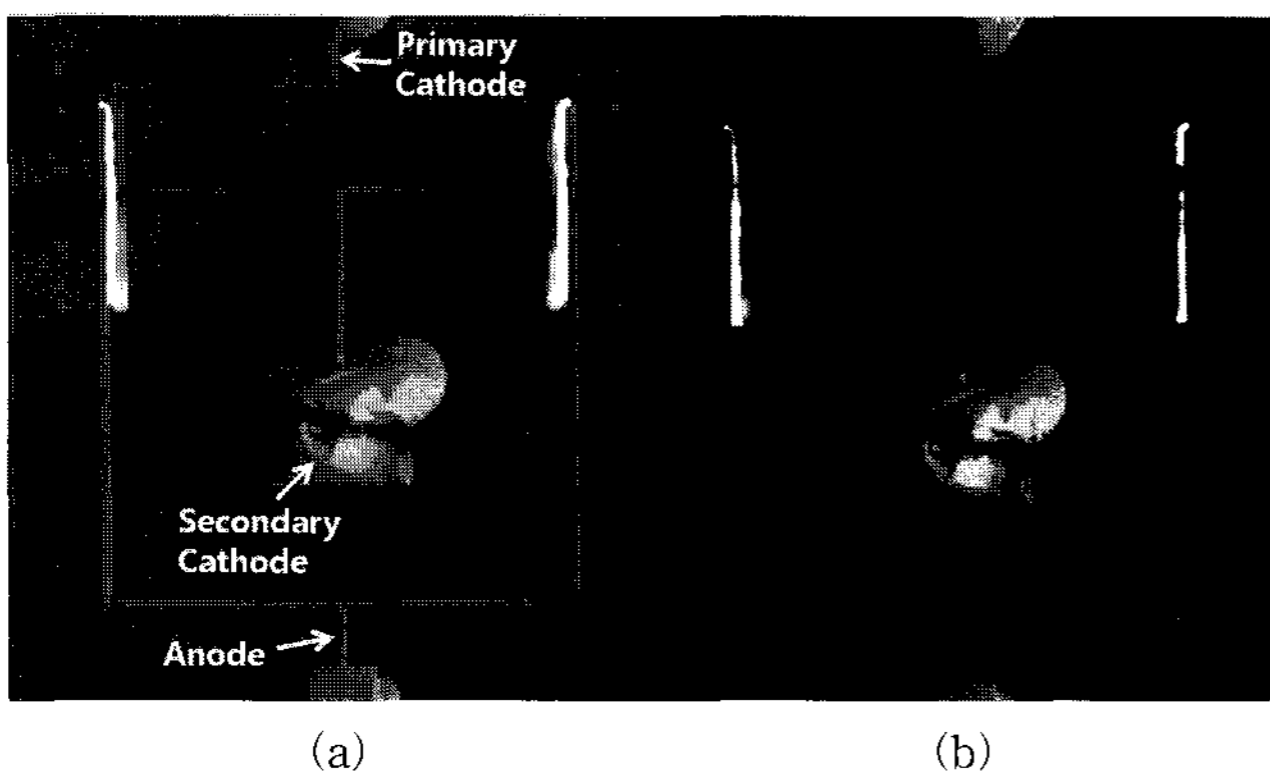


그림 5 대기압 Ar 가스 방전 실험 중 소자의 플라즈마 형성 사진(촬영 시간 1초)

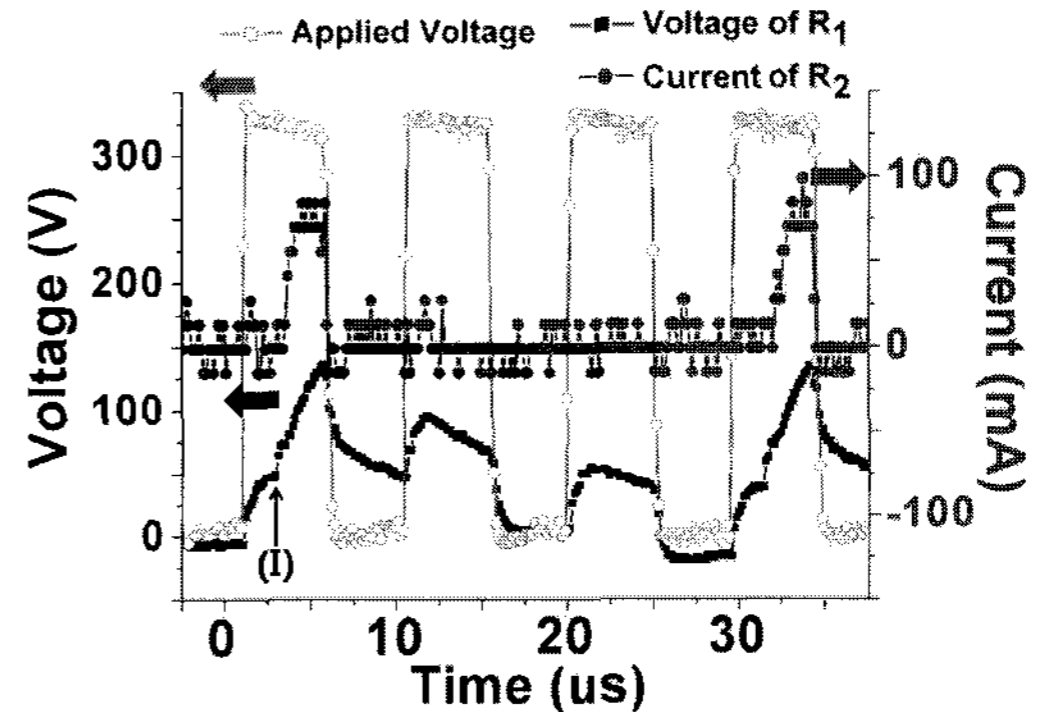
(a) 상승시간 : 100 ns (b) 상승시간: 800 ns

Fig. 5 Photographic images of plasma generated in glow discharge mode at atmospheric Ar ambient.

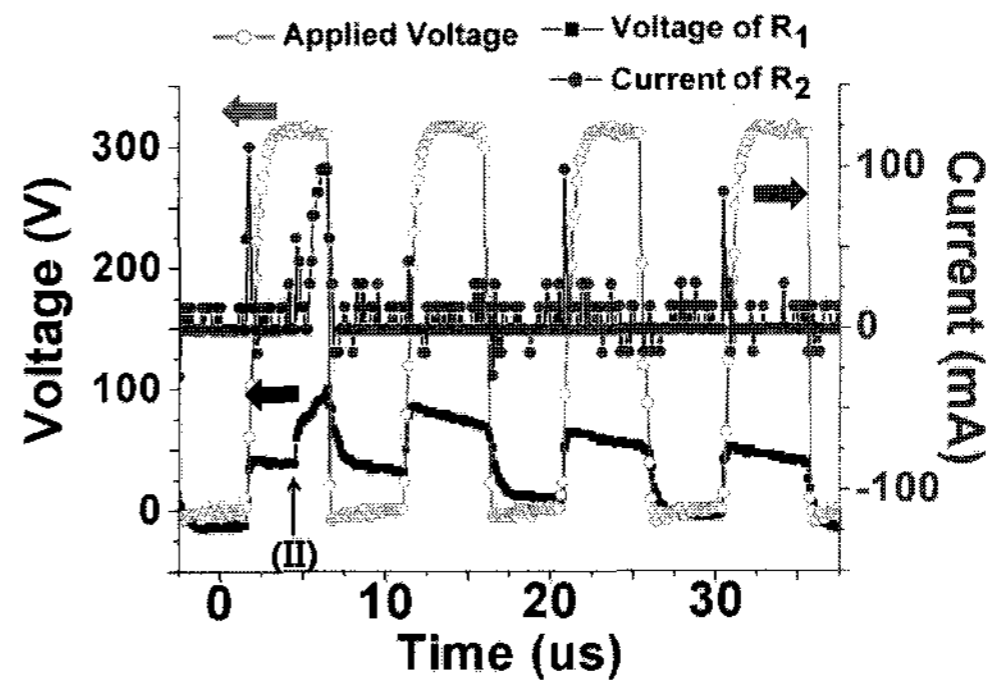
(a) rise time : 100 ns (b) rise time : 800 ns

그림 5는 제작된 방전 소자를 사용하여 인가전압의 상승시간을 변화시키며 플라즈마 발생 시 모습을 기록한 사진이다. 방전 소자의 동작 전압은 300 V이며, 그림 (a)는 상승시간이 100 ns, 그림 (b)는 상승시간이 800 ns으로 방전 시 상승시간이 짧을수록 플라즈마의 발생이 전극 전체에 균일하게 들어오는 것을 확인 할 수 있다. 한편 플라즈마 발생 시 소자의 I-V 측정을 통해 플라즈마 부하 전력(loading power)을 측정하고자 하였다. 그림 6에서는 플라즈마 발생 시 ballast 저항 (R_{B1} , R_{B2}) 흐르는 전류와 방전 소자에 인가한 pulse 전원을 보여주고 있으며 펄스 전원의 상승시간을 변화해 가며 방전 시 방전 전류를 측정 하였다. 100 ns 경우 제 1음전극에 걸리는 전압은 150 V정도이며 제 2음전극

에 흐르는 최대 전류량은 100 mA 정도이다. 800 ns 경우 제 1음전극에 걸리는 전압은 120 V정도이며 제 2음전극에 흐르는 최대 전류량은 100 mA 이다. 상승시간과 관계없이 플라즈마의 발생시 최대 순간 부하전력(loading power)은 약 2.2 W 이다. 하지만 상승 시간의 변화에 따라 플라즈마 발생 전 지연 시간이 다름을 알 수 있었는데, 100 ns 상승 시간 경우 플라즈마가 발생하기 전의 지연시간은 그림 6(a)에서 보듯이 약 1 μ s 정도이며 플라즈마가 발생하는 시간은 2 μ s이다. 800 ns 상승 시간 경우 그림 6(b)에서 보듯이 지연시간은 약 2 μ s정도이고 플라즈마가 발생하는 시간은 1 μ s정도이다. 상승시간이 100 ns와 800 ns 일 때의 플라즈마가 발생하는 시간은 약 1 μ s 정도 차이를 보이며, 100 ns의 경우 같은 부하전력으로 약 1 μ s 정도 더 플라즈마가 발생이 지속 되는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 7에서는 상승 시간에 따른 플라즈마 방출 스펙트럼(emission spectrum)의 빛 세기 (intensity) 변화를 측정하였다. 플라즈마 방출 스펙트럼 측정 시 공기 중에서 Ar 가스를 유동(flow) 시켜 방전실험을 측정하였으며, 이에 Ar, N_2 그리고 O_2 에 해당하는 빛 파장에서 빛 세기가 커짐이 관찰 되었다. 그림 6에서 보듯이 100 ns의 상승시간을 사용할 경우 800 ns 상승시간보다 빛의 세기가 높게 측정되었는데 이는 I-V 측정과 일치하는 결과로 상승시간이 짧을수록 플라즈마의 부하전력이 증가됨을 말한다.



(a)



(b)

그림 6 대기압 Ar 가스 방전 실험 중 소자의 플라즈마 형성 I-V 특성

(a) 상승시간 : 100 ns (b) 상승시간 : 800 ns

Fig. 6 I-V characteristics of Plasma generation in Argon gas ambient at atmosphere pressure.

(a) rise time : 100 ns (b) rise time : 800 ns

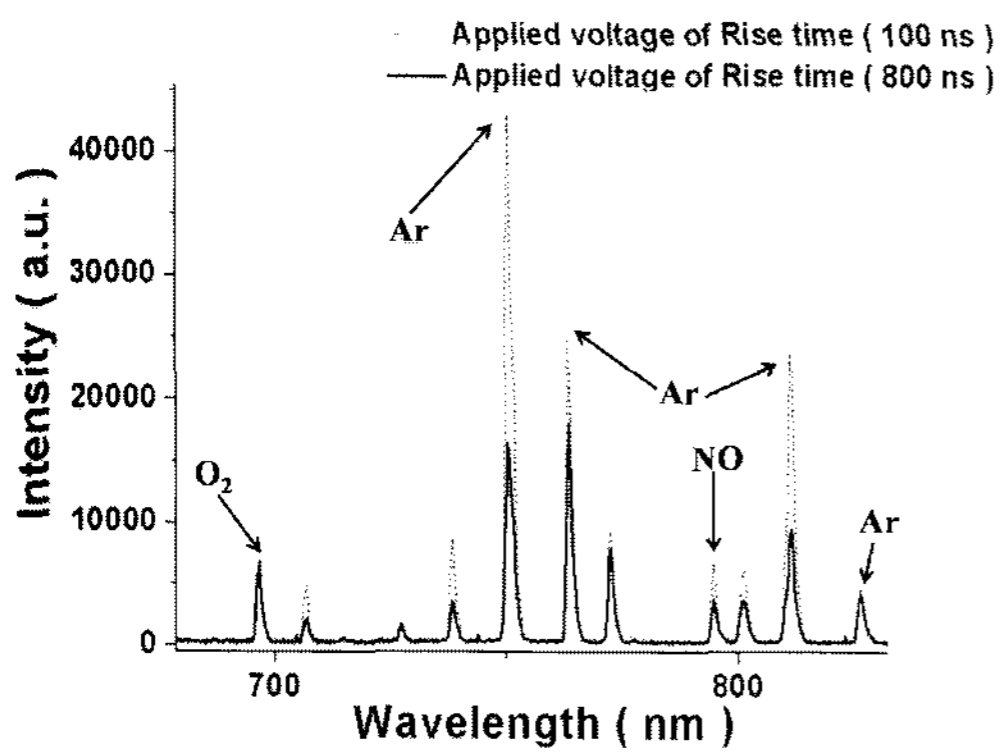
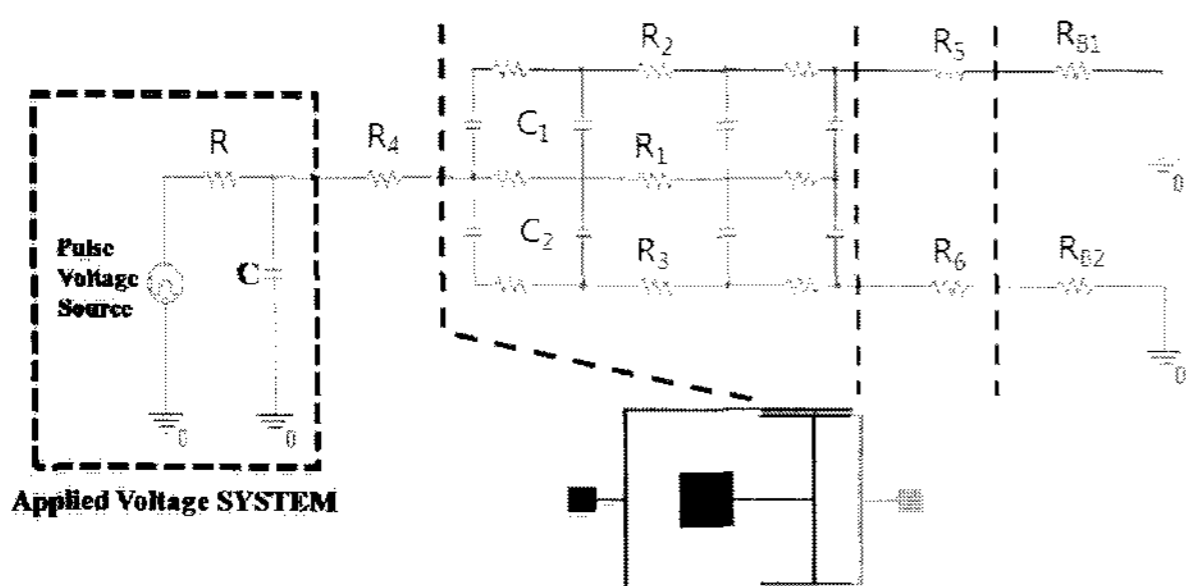


그림 7 마이크로 플라즈마 방출 스펙트럼. 방전 실험 동안 공기 중에서 아르곤가스를 주입하여 측정

Fig. 7 Emission spectrum of generated atmospheric plasma. Argon was used as the carrier gas in ambient air for the discharge experiment.

5. 인가전압 시스템에 대한 시뮬레이션

플라즈마의 발생에 상승시간이 미치는 영향을 이해하기 위해서 SPICE를 이용하여 마이크로 전극에 가해지는 전압을 시뮬레이션 하였다. 그림 8은 플라즈마를 발생시키기 위한 펄스 전압 회로와 마이크로 방전소자의 전기적 등가회로로 SPICE 시뮬레이션에 사용되었다. R과 C값은 펄스 전압 회로의 출력 단 임피던스로 R은 2.5 kΩ, C는 0.07 nF으로 측정되었다. 측정된 마이크로 소자의 저항 값과 커패시턴스 값은 그림 8에 표기하였다. 그림 8의 등가 회로를 이용한 SPICE의 시뮬레이션은 그림 9에서 보여주고 있으며, 펄스 생성 회로에 의해 100 ns인 상승 시간을 갖는 펄스전압



R ₁	플라즈마	양전극	5.5 Ω
R ₂	형성영역	제 1 음전극	6.8 Ω
R ₃		제 2 음전극	5.5 Ω
R ₄	양전극		1.65 Ω
R ₅	제 1 음전극		7 Ω
R ₆	제 2 음전극		1.65 Ω
R _{B1}	제 1음전극의 안정 저항		200 kΩ
R _{B2}	제 2음전극의 안정 저항		220 Ω
C ₁	양전극 & 제 1음전극		0.15 pF
C ₂	양전극 & 제 2음전극		0.28 pF

그림 8 SPICE 시뮬레이션용 플라즈마발생 실험의 등가회로
Fig. 8 Equivalent circuit of plasma generating setup for SPICE simulation

이 1 μs 정도 지연되어 소자에 인가되는 것을 보여준다. 이 시뮬레이션 결과는 플라즈마 발생 회로에 존재하는 저항 값과 커패시턴스에 의한 상승시간 지연이 수 마이크로 단위 간격에서 발생하는 방전에 중요한 역할을 할 수 있음을 예시하고 있다.

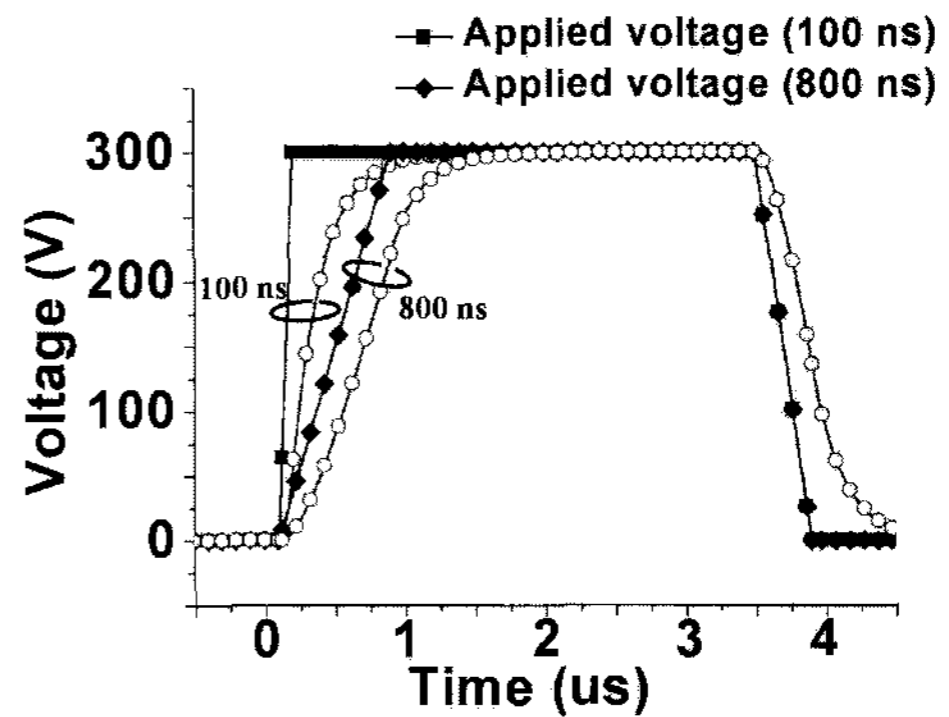


그림 9 SPICE를 이용한 인가전압 시스템의 지연시간 시뮬레이션

Fig. 9 Simulated voltage delay prior to gas breakdown using SPICE.

4. 결 론

본 논문에서는 플라즈마 발생 마이크로 소자를 이용하여 저 전압 대기압 플라즈마 발생 시 인가전압의 상승시간에 따른 플라즈마 특성에 대해 연구하였다. 실제 실험 결과를 통해 상승시간이 빠를수록 플라즈마가 더 균일하게 발생됨을 확인 할 수 있었으며 이러한 상관관계를 설명할 수 있는 물리적 해석을 제시하였다. 또한 SPICE를 통해 인가전압의 발생회로에서 발생하는 펄스전압 상승시간의 지연이 플라즈마 발생에 영향을 줄 수 있음을 보였다.

감사의 글

“이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임” (KRF-2007-313-D00281)

참 고 문 헌

[1] S.-J. Park, J. Chen, C. Liu, and J. G. Eden, Appl. Phys. Lett. 78, 4 2001.
 [2] T. Yokoyama, S. Hamada, S. Ibuka, K. Yasuoka, and S. Ishii, J. Phys. D, 38, 1684, 2005.
 [3] H. Park, T. Lee, K. Park, H. Baik, S. Lee, and K. Song, Appl. Phys. Lett., 82, 19, 2003.
 [4] S.H.Han and Y.M.Kim, Journal of Vacuum Science and Technology, vol.25, pp.286-288, Jan/Feb 2007.
 [5] S.L.Yao, E.Suzuki, N.Meng and A.Nakayama, energy & Fuels, vol. 15, pp.1300-1303, 2001.

- [6] Jeffrey I. Levatter and Shao-Chi Lin, J. Appl. Phys. Vol. 51, Jan 1980.
- [7] Nils Brenning, Ingvar Axnas, J. Olof Nilsson, and Jan E. Eninger, IEEE Transaction On Plasma Science, vol. 25, NO. 1, Feb 1997.
- [8] M. Surendra, D.B Graves, and G.M.Jellum, Physical Review A, vol. 41, Number2, 15 Jan 1990.
- [9] A. Bogaerts, R. Gijbels, J. Appl. Phys. 78(4), 15 August 1995.

저 자 소 개



김재혁 (金載赫)

1979년 6월 23일생.
2006년 홍익대 전자전기공학부 졸업.
2006년~현재 홍익대 대학원
전기정보제어공학과 석사과정
Tel : 02-320-3097
E-mail : jhkim777@gmail.com



진상일 (陳相逸)

1981년 11월 18일생.
2007년 홍익대 전자전기공학부 졸업.
2007년~ 현재 홍익대 대학원
전기정보제어공학과 석사과정
Tel : 02-320-3097
E-mail : riverace@naver.com



김영민 (金榮珉)

1964년 8월 16일생.
1987년 서울대 전기공학과 졸업.
1995년 University of Texas at Austin
Dept. of Electrical & Computer
Engineering, Ph.D.
1995년~2002년 Texas Instruments Inc.
Member of Technical staff
2002년~ 홍익대 전자전기공학부 부교수
Tel : 02-320-1612
E-mail : ymkim@hongik.ac.kr