

# 유전체 장벽 방전(DBD) 씨드 캐리어를 이용한 저 전압 대기압 플라즈마 발생

## Low Voltage Atmospheric Plasma Generation using DBD Initiation Carrier Injection

황 솔\* · 박 현 호\* · 김 영 민\*  
(Sol Hwang · Hyunho Park · Youngmin Kim)

**Abstract** - Low voltage atmospheric plasma generation using DBD Initiation carrier injection is reported. DBD afterglow was used as initiation carriers prior to a primary discharge and a significant reduction in the breakdown voltage of atmospheric discharge was observed when sufficient initiation carriers were provided. Quantative correlation study between the breakdown voltage and the initiation carriers suggests that the atmospheric breakdown voltage reduces to only half of the breakdown voltage for Townsend regime. Also, use of DBD initiation carrier injection likely offers better device reliability by protecting electrodes with a dielectric layer and thus suppressing electrode wear.

**Key Words** : Afterglow, Seed carrier, Atmospheric plasma, DBD

### 1. 서 론

고비용의 진공장치 없이 플라즈마를 발생시킬 수 있는 대기압 플라즈마 발생 기술은 최근 들어 플라즈마 메디슨(Plasma Medicine)과 플라즈마 액추에이터(Plasma Actuator) 같은 새로운 분야에 적용 가능성으로 많은 주목을 받고 있다[1,2]. 저온 대기압 플라즈마 이온은 병원균 살균 방법 또는 비행 물체 표면 부근 기체의 물리적인 특성을 변화시켜 비행 효율 개선에 적용될 수 있음이 보고된 바 있으나 높은 항복 전압 및 플라즈마의 불안정성은 대기압 플라즈마 기술 실현에 장애물이 되어왔다. 이러한 대기압 플라즈마 기술의 한계를 극복하기 위해 최근 방전 개시 전 씨드 캐리어 주입으로 항복 전압의 저감 연구[3] 또는 수십 나노 초 상승시간(Rise Time)[4]을 갖는 전압을 인가하여 균일하고 안정적인 글로우 방전 구현 같은 폭 넓은 대기압 플라즈마 실현 기술에 대한 연구가 이루어져 왔다. 특히 방전 개시 전 자외선[5] 또는 전기적[6] 자극을 이용한 씨드 캐리어 주입을 통해 플라즈마 발생 전압이 감소 될 수 있는 결과가 보고되어 대기압 플라즈마 기술의 실용화 가능성을 제시하고 있으나 신뢰성 높은 씨드 캐리어 주입 기반 저 전압 플라즈마 발생 기술은 아직 초보적인 수준에 머무르고 있다. 본 논문에서는 저전압 대기압 플라즈마 소자를 위한 DBD 씨드 캐리어 주입 방법을 제시

하고 있으며 씨드 캐리어 밀도가 대기압 방전 항복 전압에 미치는 영향을 실험적으로 확인하였다.

### 2. 본 론

유전체 장벽 방전(DBD)은 그림 1과 같이 유연한 폴리이미드 기판에 집적된 25  $\mu\text{m}$  두께의 구리 전극에 30 kHz의 주파수를 가진 1 kV AC 전압을 인가하여 대기압 아르곤에서 발생하였다. 그림 2는 측정된 DBD의 전압-전류 특성을 나타내고 있는데 동작 전류는 DBD 소자와 직렬로 연결된 저항  $R_1=1\text{ k}\Omega$ 을 이용하여

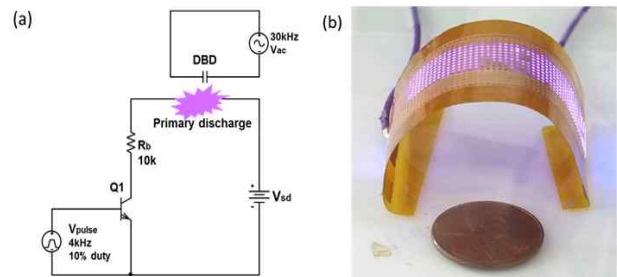


그림 1 (a) DBD 에프터글로우를 이용한 저 전압 플라즈마 발생 회로, (b) 유연한 기판 위에 형성된 대기압 아르곤 플라즈마

Fig. 1 (a) Plasma generation circuit utilizing DBD afterglow (b) Atmospheric Plasma generated on a flexible substrate

† Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Hong-ik University, Korea.  
E-mail : ymkim@hongik.ac.kr

\* School of Electrical and Electronic Engineering, Hong-ik University, Korea.

Received : November 22, 2017; Accepted : December 26, 2017

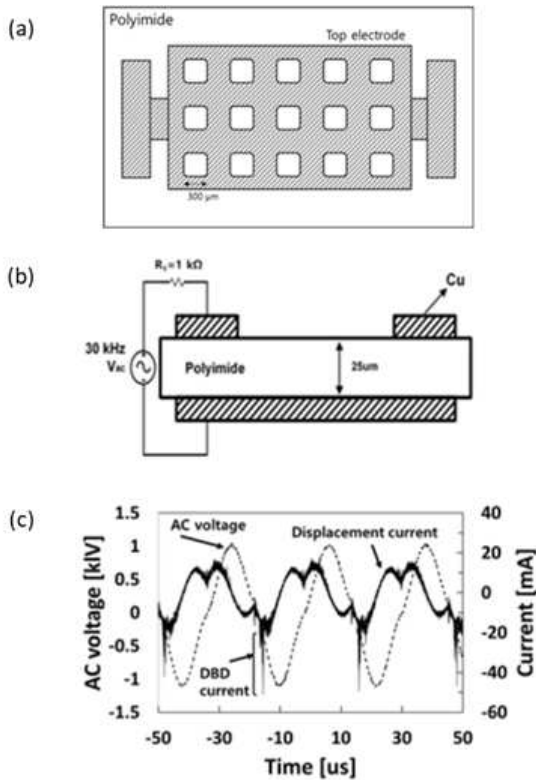


그림 2 (a) DBD 소자 Top View, (b) DBD 소자의 Cross-Section, (c) DBD 전압-전류 특성 측정

Fig. 2 (a) a top-down view of DBD electrode (b) a cross-sectional view of DBD electrode (c) Voltage-Current characteristics of DBD

측정하였다(그림 2(b)). 그림 2(c)는 측정된 전류가 변위 전류(Displacement Current)와 DBD 전류가 혼합된 형태를 띠고 있음을 보여주고 있으며 DBD 전류는 변위 전류와 현저히 구별되고 최대 20 mA 크기를 갖고 있음을 알 수 있다. DBD를 통해 생성된 이온을 후속 방전의 씨드 캐리어로 사용하기 위해 주 방전 전극을 DBD 전극의 수 백  $\mu\text{m}$  위에 설치하였다. DBD에 의해 생성된 전자와 이온 중 일부가 확산되어 양극과 음극 간 방전을 위한 씨드 캐리어의 역할을 할 수 있을 것으로 기대할 수 있는데 대기압 아르곤 플라즈마 내에서 이온과 전자 간의 재결합으로 인한 이온의 평균 수명은 약  $100 \mu\text{sec}$ 으로 보고된 바 있다 [4]. 대기압에서 아르곤 이온의 이동도(mobility)는 약  $2.4 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ [5]이며 DBD 발생으로 생성된 전자 및 이온들의 확산 이동과 이온사이의 정전 반발력(Repulsive Electrostatic Force)에 의한 산란을 고려해볼 때 DBD 에프터글로우(afterglow)에 의한 씨드 캐리어의 주입은 현실적으로 가능할 것으로 예측된다.

주 방전 전극으로는 텅스텐 프로브(Tungsten Probe)가 사용되었으며 양극과 음극간 거리는 그림 3에서와 같이  $300 \mu\text{m}$ 로 고정되었다. 음극에 직렬로 연결된 바이폴라 트랜지스터(Q1, Fairchild 2N3904) 베이스(Base)에 4 kHz 펄스 전압을 인가하여 펄스 방전을 구현하였으며 펄스 전압의 선택 비(Duty Ratio)를

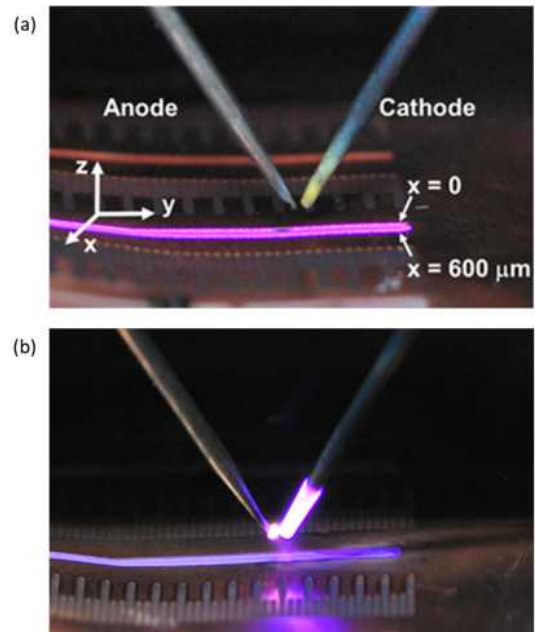


그림 3 DBD 전극 위에서 발생한 글로우 방전 이미지. (a) DBD 만 켜진 상태, (b) DBD 씨드 캐리어가 주입된 펄스 글로우 방전

Fig. 3 Images of glow discharge generated on DBD electrode. (a) Only DBD turns on (b) Pulsed glow discharge in the presence of DBD initiation carriers.

변화시켜 방전 온-오프를 조절하였다(그림 1(a)). DBD 전극과 주 방전 전극 사이의 전기적 간섭을 피하기 위해 2개의 분리된 전압원이 사용되었으며, 이를 통해 DBD 전압에 관계없이 주 방전 전극 간 독립적인 전압 제어가 가능하였다. 그림 3(a)는 DBD 턴-온 시 발생된 대기압 플라즈마 이미지를 보여주고 있으며 그림 3(b)는 DBD 에프터글로우 주입을 기반으로 10% 선택 비를 갖는 800V 펄스 전압을 주 방전 전극에 인가하여 형성된 글로우 방전을 보여주고 있다. 기존 3전극(triode) 구조[6]에서는 씨드 캐리어 생성과 주 방전 모두 펄스 전원이 사용되었으며 플라즈마 발생 시 이온들의 전극 스퍼터링(Sputtering)에 의한 전극 마모 및 전극 간 단락이 문제점으로 보고되었다. 본 연구에서는 DBD를 이용한 씨드 캐리어 생성을 제안하고 있는데 이러한 방법은 전극을 유전체 층으로 보호함으로써 플라즈마 스퍼터링에 의한 전극 마모와 단락을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 미세 방전 소자의 불량은 스퍼터링에 의한 전극 단락/마모에 의해 대부분 유발되므로 전극을 유전체층으로 보호하여 소자의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다. 또한 그림 3(b)에서와 같이 음극 주변 넓은 영역에서 강한 빛 방출이 관찰되었는데 이는 여기된 이온(Excited Ions)들에 의한 광 방출로 음극 쉬스(Sheath) 근처에 고밀도의 여기된 이온들이 형성되어 있음을 추측할 수 있다.

그림 4는 4 kHz의 800 V 펄스 전압이 인가되었을 때 주 방전의 전압-전류 특성을 나타낸다. 바이폴라 트랜지스터 베이스에

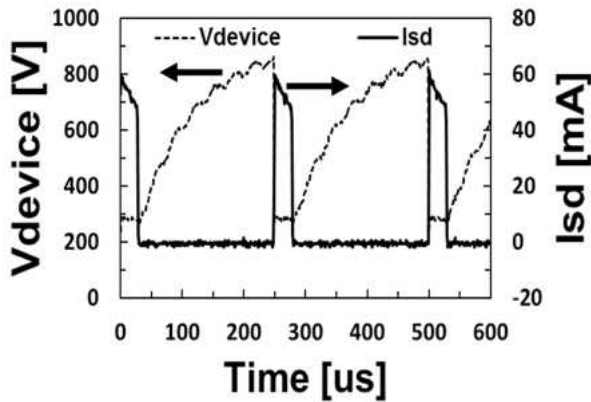


그림 4 대기압 펄스 방전의 전압-전류 특성. DBD 에프터글로우 주입 시 항복 전압은 850 V이며 방전 유지 전압과 전류는 각각 300 V와 50 mA이다.

Fig. 4 Voltage-current characteristics of atmospheric pulsed discharge. In the presence of DBD afterglow, breakdown voltage became only 850 V. The discharge sustained at 300 V and discharge current was 50 mA.

펄스 전압을 인가하여 주 방전을 온-오프 하였으며 주 방전이 온 되었을 때, 방전 유지 전압(Sustaining Voltage)은 300 V로 유지 되었다. 씨드 캐리어 중 아르곤 이온은 전기장에 의해 음극으로 드리프트(Drift)되어 음극 표면과 충돌하게 되고 이 과정에서 2차 전자 방출(Secondary Electron Emission)을 유발하고 발생된 2차 전자들은 전기장에 의해 가속되어 애벌런치 항복(Avalanche Breakdown)을 야기한다. 일단 방전이 개시 되면 2차 전자로 인한 충돌 전리(Impact Ionization)로 많은 수의 이온과 전자가 발생되어 낮은 전기장에서도 포지티브 피드백 애벌런치(Positive Feedback Avalanche)가 유지될 수 있으며 이로 인해 항복 전압보다 낮은 전압으로도 플라즈마 발생이 지속될 수 있다. 본 연구에서 측정된 펄스 방전 전류(Discharge Current)는 약 50 mA로 음극 쉬스의 면적(0.6 mm<sup>2</sup>)을 고려하면 전류 밀도는 약 83 mA/mm<sup>2</sup>인데 방전 중 생성된 전자 밀도(ne)는 아래와 같은 드리프트 식을 통해 계산될 수 있다.

$$n_e = J / (q\mu_e E) \quad (1)$$

여기서 J는 펄스 방전의 전류 밀도이며  $\mu_e$ 는 아르곤 대기압에서의 전자 이동도(430 cm<sup>2</sup>/V·sec)[7], E는 주 방전 전극 간 전기장(10 kV/cm)으로 전자 밀도는 약 1.2 x 10<sup>13</sup> cm<sup>-3</sup>으로 추정된다.

주입된 씨드 캐리어에 의한 항복 전압(Breakdown Voltage)의 변화는 DBD 전극과 주 전극 간 거리에 따른 항복 전압을 측정함으로써 알 수 있다. 본 실험에서는 일정한 DBD의 전류를 흐르게 하면서, DBD 기판을 10  $\mu$ m 정밀도를 갖는 매니퓰레이터(Manipulator) 위에 설치하여 그림 3(a)의 Z 방향으로 움직이며 주 방전의 항복 전압을 측정하였다. DBD 소자와 주 방전 전극간

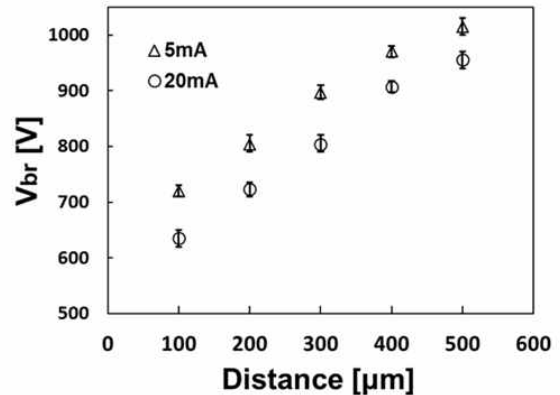


그림 5 주 전극과 DBD 소자 사이의 거리에 따른 항복 전압 변화. 전극이 DBD 소자에 가까워지거나 DBD 전류가 증가할 때 항복 전압은 현저히 감소한다.

Fig. 5 Breakdown voltage for varying a distance between primary electrodes and DBD electrodes. Breakdown voltage of a primary discharge significantly reduced as the distance decreased or DBD current increased.

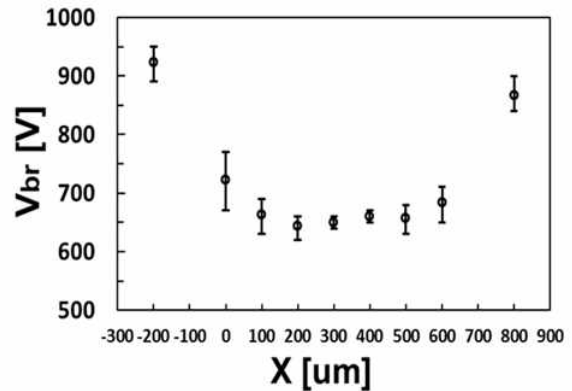


그림 6 항복 전압의 DBD 전극 위치에 따른 변화. 전극은 DBD 소자 위 200  $\mu$ m에 위치하고 그림 3의 X 방향으로 DBD 소자를 이동하였다. 그림 3(a)에서와 같이 DBD 전극 상단 경계면을 0  $\mu$ m로 정의 하였다.

Fig. 6 Breakdown voltage of primary electrodes as a function of position with respect to DBD electrodes. Primary electrodes were located at 200  $\mu$ m above DBD electrodes and moved along x-direction shown in Fig. 3. X=0  $\mu$ m was defined as shown in Fig. 3(a).

거리가 가까워질수록, 주 방전의 항복 전압이 선형적으로 감소되었는데, 주 방전의 항복 전압은 DBD 전류가 없는 경우의 항복 전압에 비해 절반에 불과한 600 V까지 감소함을 알 수 있었다(그림 5). 또한 DBD의 전류를 20 mA로 증가시킬 경우 주입된 씨드

캐리어의 밀도가 높아지고 항복 전압은 더욱 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 거리가 500  $\mu\text{m}$ 보다 커지면 주 방전의 항복 전압은 1 kV 이상으로 증가하게 되며, 이는 DBD 전류가 없는 경우의 항복 전압과 유사한 값을 갖게 된다. 이러한 결과로 미루어 보아 대기압 아르곤 환경에서 DBD 씨드 캐리어의 최대 확산 거리(Diffusion Length)는 500  $\mu\text{m}$ 로 추측할 수 있으며, 최대 확산 거리 이내에서는 플라즈마 이온들의 확산 이동과 이온간의 정전 반발력에 의해 상당수의 DBD 에프터글로우가 이온과 전자 간의 재결합으로 소멸되기 전에 주 방전 전극까지 도달하고 있는 것으로 추정된다. 두 개 전극 간 방전 시 반드시 통과해야 하는 타운젠드(Townsend) 영역을 씨드 캐리어를 외부에서 주입해줌으로써 고 전압 타운젠드 영역으로 진행하지 않고 저 전압 글로우 방전 영역으로 직접 진행함으로써 항복 전압을 저감할 수 있게 된다. 양극-음극 간 전계에 의해 가속된 씨드 캐리어는 음극 표면과 충돌하여 이차 전자를 (Secondary Electron) 방출하게 되며 방출된 전자들과 가스 분자들 간의 충돌로 더 많은 이온들이 생성되고 이로 인해 포지티브 피드백 애벌런치 항복(Positive Feedback Avalanche Breakdown)이 유기된다. 하지만 DBD 에프터글로우 밀도는 500  $\mu\text{m}$  거리에서는 급격하게 감소하여 씨드 캐리어 주입 효과를 볼 수 없음을 알 수 있다.

그림 6은 주 방전 전극보다 200  $\mu\text{m}$  아래에 위치한 DBD 소자가 X 방향으로 움직이는 동안 주 방전의 항복 전압을 보여주고 있다. 충분한 씨드 캐리어 주입을 위해 20 mA DBD 전류를 사용하였으며 X 방향 0~600  $\mu\text{m}$ 에서 항복 전압은 650 V로 일정하게 유지 되었지만 주 방전 전극이 DBD 소자에서 멀어 짐에 따라 항복 전압은 급격하게 증가하여 300  $\mu\text{m}$  떨어진 곳에서는 1 kV에 가까워짐을 알 수 있다. 이러한 결과로 DBD 전극 바깥 쪽 경계에 생성된 에프터글로우 이온 밀도가 전극 안쪽에 생성된 에프터글로우 이온 밀도보다 적을 것으로 추정되며, 측정된 두 가지 경우 결과를 통해 대기압 아르곤 환경에서 플라즈마 에프터글로우의 확산 범위는 300~500  $\mu\text{m}$  정도인 것으로 유추해 볼 수 있다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 DBD 씨드 캐리어 주입을 통해 대기압 플라즈마 발생 전압을 획기적으로 저감할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 주 방전에 필요한 씨드 캐리어를 DBD 에프터글로우를 통해 공급함으로써 방전 항복 전압을 낮추었으며, 씨드 캐리어 밀도와 항복 전압의 상관관계에 대해 연구하였다. 씨드 캐리어 주입 거리에 따른 항복 전압 감소 현상을 확인 하였으며 기존 타운젠드 항복 전압에 비해 절반 이하의 전압에서도 대기압 플라즈마 발생이 가능함을 실증하였다. 또한 유전체 장벽 방전을 이용하여 플라즈마 스퍼터링으로부터 전극을 보호함으로써 소자의 신뢰성 향상을 기대할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국 연구 재단(NRF)의 기본연구지원사업의 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다. (Nos. 2012R1A1A2006537 and 2015R1D1A1A01060213)

### References

- [1] C. Louste, G. Artana, E. Moreau, G. Touchard, "Sliding discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties", J. Electrostatics 63, pp. 615-620 (2005)
- [2] M. Laroussi, "Low-temperature Plasma for Medicine?", IEEE Trans. Plasma Sci. 37, 714 (2009).
- [3] L. Lee, Y. Kim, "Low-Voltage Atmospheric-Plasma Generation by Utilizing Afterglow Initiation Carrier", IEEE Transaction on Plasma Science, Vol. 41, 155-58, 2013
- [4] J. I. Levatier and S. Lin, "Necessary conditions for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharges at high gas pressures", Journal of Applied Physics 51, 210(1980)
- [5] X. Tian and P. Chu, "Experimental investigation of the electrical characteristics and initiation dynamics of pulsed high-voltage glow discharge", J. Phys. D: Appl. Phys. 34, pp. 354-359 (2001)
- [6] Y. Kim and J. Park, "Highly efficient initiation carrier injection for nonthermalatmospheric plasma generation", J. Vac. Sci. Technol. B 33(6), 062002-1, (2015)
- [7] Y. P. Raizer, Gas Discharge Physics (Springer, Berlin, 1991), Chap. 2.

### 저 자 소 개



#### 황 솔 (Sol Hwang)

1989년 11월 9일생.

2015년 홍익대학교 전자공학부 졸업.

2017년 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정 졸업.

E-mail : victllo@naver.com



**박 현 호 (Hyunho Park)**

1982년 8월 12일생.  
2009년 홍익대학교 전자공학부 졸업.  
2011년 홍익대학교 대학원 전기공학과  
석사과정 졸업. 2011년~DB하이텍 품질경영  
실 재직 중. 2015년~홍익대학교 대학원 전  
기공학과 박사과정  
E-mail : park\_h2@hotmail.com



**김 영 민 (Youngmin Kim)**

1964년 8월 16일생. 1987년 서울대학교 전  
기공학과 졸업. 1995년 University of Texas  
at Austin Dept. of Electrical & Computer  
Engineering, Ph.D. 1995년~2002년 Texas  
Instruments Inc. Kilby R&D. 2002년~홍익  
대 전자전기공학부 교수  
Tel : 02-320-1612  
E-mail : ymkim@hongik.ac.kr