

서브마이크로 펄스 전압파형을 이용한 대기압 저온 마이크로 플라즈마 소스 개발

論 文

56-10-17

The Development of Non-thermal Micro Plasma Source Under Atmospheric Pressure by Means of Submicrosecond Pulse Voltage Waveforms

崔 竣 榮[†] · 李 晷 駿^{*} · 金 東 鉉^{**} · 李 海 準^{***} · 朴 正 后[§]

(Joon-Young Choi · Ho-Jun Lee · Dong-Hyun Kim · Hae June Lee · Chung-Hoo Park)

Abstract - Nowadays, many configurations and applications of small atmospheric plasma source have been investigated with growing interest, as it provides the bacteria inactivation, the surface modification and removal of unwanted small regions, and so on. In this paper, the non-thermal micro plasma source under atmospheric pressure by means of submicrosecond pulse voltage waveforms is suggested. Plasma operates in helium is appears as a small (sub-mm) glow at the tip of a plasma gun. Electrical measurements show that the plasma source operates at low voltage (about 500V) and the power consumption is about 1W at 25kHz. Moreover, the emission spectrum shows the relatively higher emission intensity of oxygen particles than those of helium and nitrogen.

Key Words : Micro Plasma, Atmospheric Pressure Plasma, APP, Submicrosecond Pulse, Plasma Source

1. 서 론

대기압 플라즈마 기술은 그 응용의 다양성으로 인해 산업적으로 대단히 매력적인 기술이다. 종래 진공 플라즈마에 비해 대기압 플라즈마의 발생은 대단히 어렵지만 실제 산업분야에서 사용될 시에는 저렴한 가격, 간편한 시스템 및 환경문제를 해결 하면서도 각종 재료 및 물질의 처리를 진공 플라즈마와 같은 효과를 내는 이상적인 기술이며, 기존의 진공 플라즈마에서는 가격의 경쟁력, 휴대성, 그리고 간편성 등 때문에 적용되지 않았던 새로운 분야에서도 응용이 가능한 기술이다 [1-3]

이러한 대기압 플라즈마 기술 중, 소형 플라즈마 소스는 의료용, 특정부위의 표면개질 또는 표면제거 및 절단 등의 응용분야로 현재 연구가 활발히 진행되고 있으며 APPJ (Atmospheric Pressure Plasma Jet)[3-4], Plasma pencil[5], Plasma needle[6] 등과 같은 장치가 개발되어 있다. 소형 플라즈마 소스들은 주로 DBD(Dielectric Barrier Discharge)나 RF전원을 사용하여 발생시킨다.

DBD 방식은 쌍을 이루는 두 개의 전극 또는 한 개의 전극에만 유전체 장벽을 설치하여 유전분극 현상을 이용하여 전하집적을 통한 역전위 형성으로 방전이 정지되는 즉, 펄스 방전으로 되어 아크방전으로 전환되는 것을 막는 방식이다. 이 방식은 균일한 플라즈마를 얻을 수 있으나 플라즈마 밀도가

가 낮고 유전체 장벽을 우선으로 생각해야하기 때문에 전극 설계 및 장치 설계에 한계가 있으며 무효전력에 의한 전력손실이 큰 단점이 있다 [7].

RF 전원을 이용한 방식은 13.56MHz의 고주파 전압이 전극 사이에 인가되어 플라즈마 밀도 등을 향상시키고, 전력이 고주파 전원에 접속되어 임피던스 정합장치를 통해 전극에 공급되면서 효율을 극대화시켜 방전이 발생한다. 이 경우 고주파 에너지로 인해 방전 공간으로부터 방출된 플라즈마의 온도가 증가되어 처리될 대상물이 열에 의해 손상을 받기 때문에 전극설계에 제한을 받게 되며, 고주파 전원 및 임피던스 정합장치를 사용해야 하기 때문에 고가의 설치비가 요구된다. 또한 반응 용기 또는 전극 근처에 임피던스 정합장치를 배치하는 것이 필요하기 때문에 플라즈마 처리장치의 설계 자유도가 감소된다 [6].

따라서 본 연구에서는 대기압 하에서 두 개의 금속전극 양단에 아주 좁은 폭(수백ns)의 펄스전압을 인가하여 대기압/저온 마이크로 플라즈마를 지속적으로 발생시키는 방법을 제안하고 구동전원 특성 및 플라즈마의 전기, 광학적 특성에 관한 연구를 행하였다

2. 실험 방법

그림 1(a)와 (b)는 Point 소스형 플라즈마 Gun의 개략도와 사진을 나타내고 있다. Pen type의 유리관 내부에 두 개의 마주 보고 있는 금속전극(Al)이 위치하며 전극이 유리관으로 삽입되는 부위는 가스의 유출을 막기 위해 절연체로 덮여져 있다. 서로 마주 보고 있는 전극들의 간격은 유리관 끝부분의 간격에 의해 결정하며 본 연구에서는 전극간격을 0.2[mm]로 하였다. 플라즈마가 발생되어 나오는 부분은 1.8[mm], 가스가 주입되는 부분은 5[mm], 그리고 플라즈마 Gun의 총 길이는 150[mm]로 하였다.

그림 2(a)와 (b)는 대기압/저온 마이크로 플라즈마 발생장

[†] 교신저자, 正會員 : 釜山大學 電氣工學科 博士 後 科程 · 工博
E-mail : plasma@pusan.ac.kr

^{*} 正 會 員 : 釜山大學 電氣工學科 副教授 · 工博

^{**} 非 會 員 : 釜山大學 PDP研究所 研究員 · 工博

^{***} 正 會 員 : 釜山大學 電氣工學科 助教授 · 理學博士

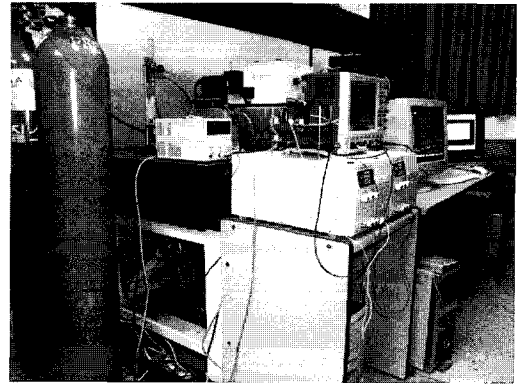
[§] 正 會 員 : 釜山大學 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2007年 7月 23日

最終完了 : 2007年 8月 23日

치의 시스템 개략도와 그림을 나타내고 있다. 시스템은 듀티, 주파수제어가 가능한 펄스 발생기(Time98, ASCOM), DC Power supply, 가스공급원, 그리고 자체 제작한 DC 펄스전압 발생장치와 Point 소스형 플라즈마 Gun으로 구성되어 있다. 펄스 발생기는 듀티 0~1, 주파수 0~50[MHz]까지 변화 가능하며 DC Power supply는 0~1[kV]까지 변화 가능하다. 플라즈마 발생에 필요한 반응가스는 고순도 He를 사용하였으며, 가스 공급기는 0~10[l/min]까지 제어할 수 있다.

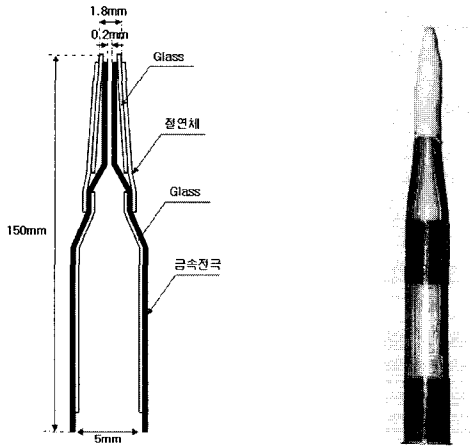
본 실험에서는 플라즈마 Gun의 내부에 He가스를 주입하면서 두 개의 금속전극 양단에 아주 좁은 폭(수백ns)의 펄스전압을 인가하여 플라즈마가 발생 시 점차 증가하는 방전전류를 억제하여 Arc로의 전이를 막고 대기압/저온 마이크로 플라즈마를 지속적으로 발생시키는 방법을 적용하였다. DC 펄스전압의 폭은 380[ns], 인가전압 450~550[V], 구동 주파수 25[kHz], 가스 Flow 세기 5[l/min]으로 하였으며, 인가전압 및 방전전류는 디지털 오실로스코프 (Wavesurfer 434, Lecroy)에 의해 측정하였으며, Emission spectrum은 스펙트럼 포토미터 (SpectraPro 300i, ARC)에 의해 측정하였다.



(b) Photograph

그림 2. 대기압/저온 마이크로 플라즈마 발생장치의 시스템 개략도와 그림

Fig. 2 Schematic diagram and photograph of atmospheric pressure/non-thermal micro plasma apparatus



(a) Schematic diagram

(b) Photograph

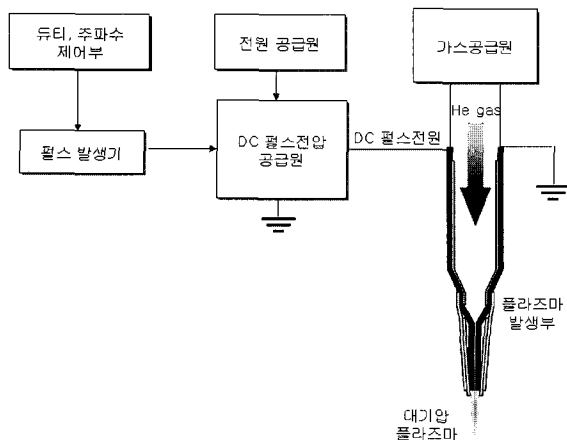
그림 1. Point 소스형 플라즈마 Gun의 개략도와 사진

Fig. 1 Schematic diagram and photograph of Point source type plasma gun

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 직접 제작된 DC 펄스전압 발생장치의 구성도를 나타내고 있다. 스위칭 드라이브 IC의 신호 IN/OUT 지연시간은 t_{on} 550[ns], t_{off} 350[ns]이다. 따라서 $t_{on/off}$ 의 지연시간이 다름으로 항상 Signal OUT 1과 2 사이에는 스위칭 소자들의 Short 방지를 위해 그림 4(a)와 같이 200[ns]의 스위칭 소자 보호구간이 생긴다. DC 펄스전압의 발생은 그림 4(b)와 같이 DC전압(40V)을 인가할 경우, Signal OUT 1의 t_{on} 시점에서 발생하며 t_{off} 시점에 도달하더라도 출력선로 상의 부유용량으로 인해 DC 전압이 충전되어 Signal OUT 2의 t_{on} 시점까지 계속 출력이 된다.

그림 5는 대기압/저온 플라즈마 발생 시 방전전류에 의한 DC 펄스전압의 왜곡현상을 나타내고 있다. 플라즈마 발생 시 선로 상에 흐르는 전류로 인해 Signal OUT 1의 t_{off} 시점 후에 충전되어 출력되는 DC 펄스전압은 왜곡현상이 발생한다. 따라서 이러한 구동회로의 특성과 아주 좁은 폭(380ns)의 펄스전압으로 금속전극에서의 방전전류 제어가 가능하게 된다.



(a) Schematic diagram

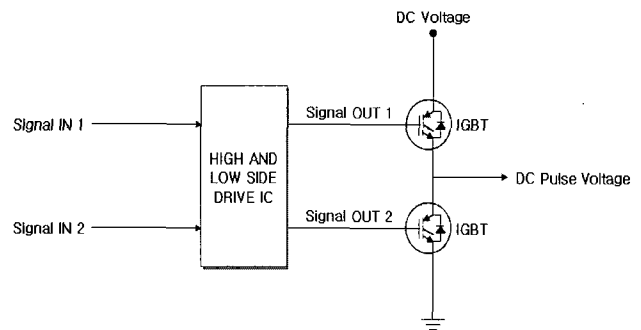
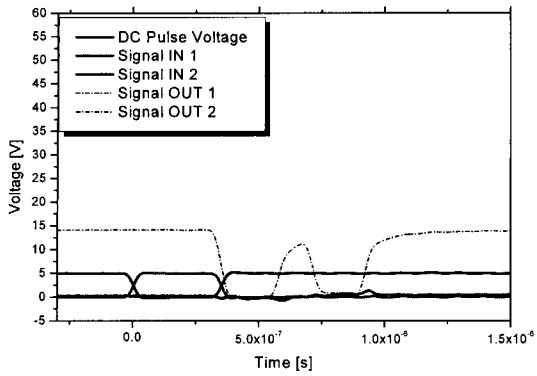
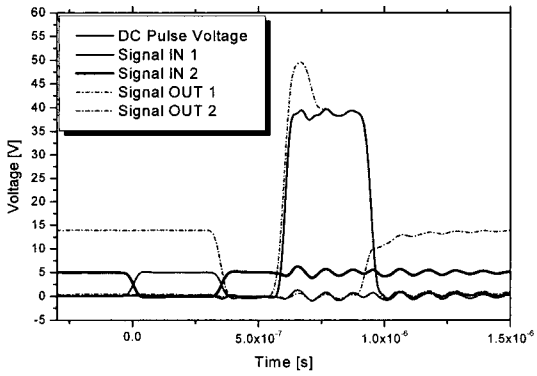


그림 3. DC 펄스전압 발생장치의 구성도

Fig. 3 Constitution of DC pulse voltage apparatus



(a) Before applying DC voltage



(b) After applying DC voltage(40V)

그림 4. DC 펄스전압 발생장치의 구동특성

Fig. 4 Driving characteristics of DC pulse voltage apparatus

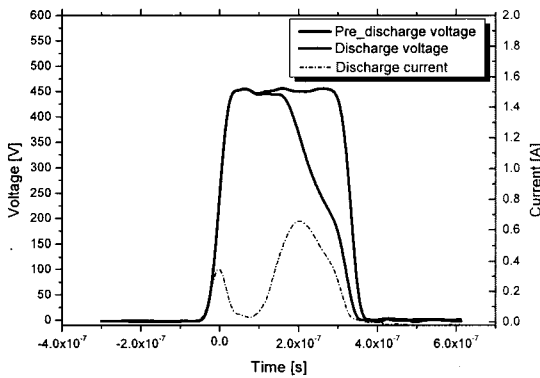


그림 5. 대기압/저온 플라즈마 발생 시 방전전류에 의한 DC 펄스전압의 왜곡현상

Fig. 5 Distortion of DC pulse voltage by the discharge current during the generation of atmospheric pressure/ non-thermal plasma

그림 6은 인가전압에 따른 방전전류를 나타내고 있다. 인가전압이 450~550[V]로 증가함에 따라 플라즈마의 방전전류도 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

그림 7은 인가전압 변화에 따른 V-I curve 특성을 나타내고 있다. curve는 무효성분 영역과 유효성분 영역으로 이루어져 있다. 좌측부분은 전압인가 시 플라즈마 Gun의 내부 capacitance 성분으로 인해 발생하는 변위전류에 의해 형성된 무효성분 영역이며, 그 외 영역은 플라즈마 방전에 의해 발생하는 유효전력 성분이다. V-I curve가 형성하는 폐곡선의 면적은 플라즈마 발생 시 펄스 1개에 의한 소비전력으로 나타난다. 그림에서와 같이 인가전압이 증가 할수록 폐곡선의 면적은 증가한다. 즉, 인가전압이 증가 할수록 소비전력이 증가하며 한 펄스 당 소모되는 에너지는 전압증가에 따라 28~56 [uJ] 정도 변화한다.

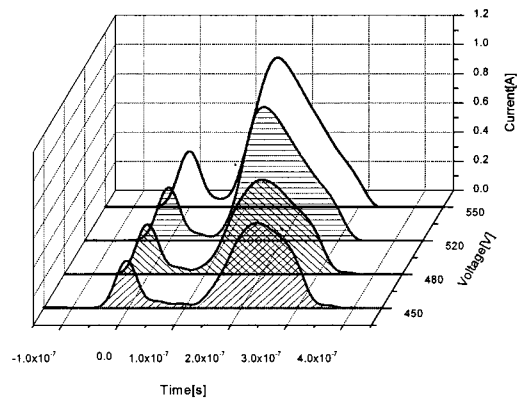


그림 6. 인가전압 변화에 따른 방전전류 특성

Fig. 6 Discharge current characteristics with various applied voltages

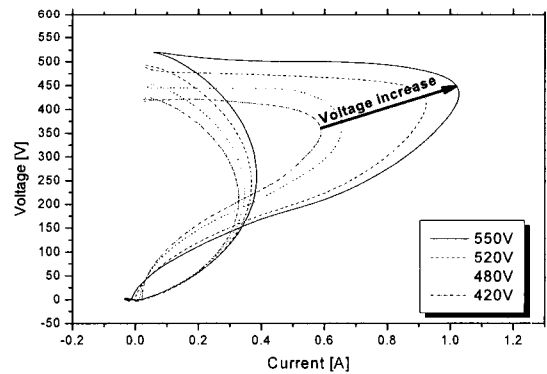


그림 7. 인가전압 변화에 따른 V-I curve 특성

Fig. 7 V-I characteristic curves with various applied voltages

그림 8은 인가전압에 따른 소비전력 특성을 나타내고 있다. 인가전압이 450~550[V]로 변화할 경우 소비전력은 0.7~1.4[W] 정도 변화한다. 따라서 향후 본 연구에서 개발된 대기압/저온 마이크로 플라즈마 소스로 어떠한 대상에 적용할 경우 아주 작은 소비전력으로 구동회로의 크기가 작아져서, 작고 이동성이 좋은 플라즈마 소스를 제작할 수 있을 것으로

예상된다.

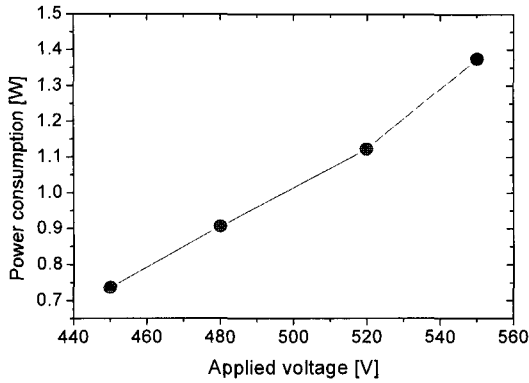
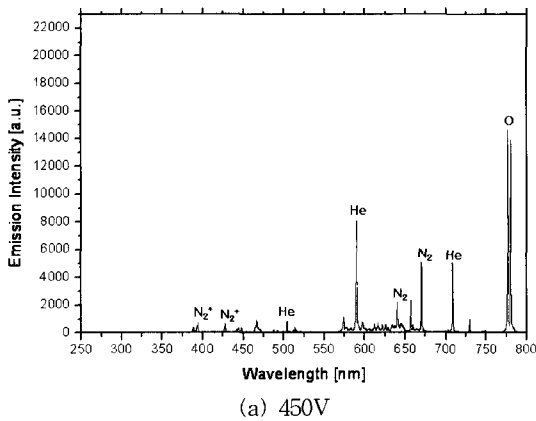


그림 8. 인가전압 변화에 따른 소비전력 특성

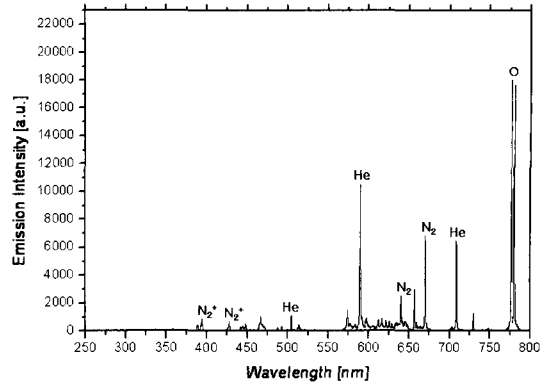
Fig. 8 Power consumption characteristics as a function of applied voltage

그림 9(a)와 (b)는 인가전압이 450[V]와 520[V]인 경우 발생하는 대기압/저온 마이크로 플라즈마의 Emission spectrum을 나타내고 있다. 인가전압의 증가에 따라 예측된 He, N₂, O의 Emission Intensity도 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 반응가스로 He를 사용 할 경우 He, N₂, O의 효과만 증가시키기 위해 전압을 변화시키면 가능할 것으로 예상된다. 일반적으로 대기압 플라즈마에서 발생하는 O 원자는 표면특성 변화 및 박테리아의 비활성에 영향을 크게 끼치는 것으로 알려져 있다.

기존의 대기압 플라즈마는 RF 전원을 사용하거나 DBD 전극이 사용되어 왔다[6-7]. 본 연구에서 개발된 Point 소스형 대기압/저온 마이크로 플라즈마인 경우 기존 발표된 대기압 플라즈마보다 He, N₂에 비해 상대적으로 O가 많이 발생하는 것으로 관측된다. 이러한 특성을 얻을 수 있는 이유는 DBD나 RF 전원을 사용하는 경우에 비해 본 연구에서 개발된 소스의 경우, 투입되는 에너지 밀도가 매우 높고, 아주 짧은 시간 동안 Arc 플라즈마에 좀 더 가까운 즉, 저전압, 대전류, 낮은 전자온도, 높은 전자밀도 등의 특성을 유지하기 때문으로 추정된다.



(a) 450V



(b) 520V

그림 9. 450V와 520V 인가 시 플라즈마의 Emission spectrum 특성

Fig. 9 Emission spectrum characteristics of plasma in applied voltages, 450V and 520V.

그림 10은 개발된 대기압/저온 마이크로 플라즈마의 실제 사진이다. 그림에서와 같이 실제 손가락에 플라즈마를 발생 시켜도 아무런 외상이 없이 안정적으로 발생하는 것을 알 수 있다.

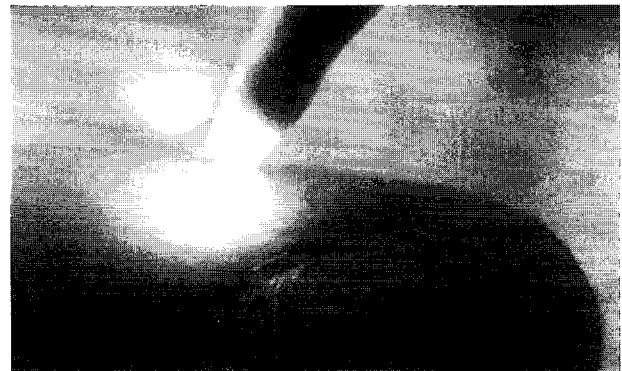


그림 10. 대기압/저온 마이크로 플라즈마의 실제 사진

Fig. 10 Photograph of atmospheric pressure/non-thermal micro plasma

4. 결론

본 연구에서는 펄스 전압파형을 이용하여 대기압/저온 마이크로 플라즈마를 개발하여 구동전원 특성 및 플라즈마의 전기, 광학적 특성에 관한 연구를 행하였다. 개발된 플라즈마 Gun은 간격이 0.2[mm]인 두 개의 마주보고 있는 금속전극 있는 Point 소스형이며, 플라즈마의 구동은 380[ns]인 아주 좁은 폭의 펄스전압을 사용하였다. He 가스를 사용하여 플라즈마를 발생시킬 경우 인가전압을 변화하여 제어가 가능하였으며, 평균 소비전력은 약 1[W]급으로 소형화가 가능할 것으로 예상된다. 또한 플라즈마에 의해 발생하는 Emission spectrum에서 He과 N₂에 비해 상대적으로 O에 의한 Emission intensity가 높은 특성을 나타낸다.

감사의 글

본 논문은 교육인적자원부·산업자원부·노동부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구 결과입니다.

참고 문헌

[1] J. R. Roth, "Industrial Plasma Engineering : Applications to Nonthermal Plasma Processing", Institute of physics, Vol. 2, pp. 37-73, 2001

[2] Schoenbach, K, Barker, R, Liu, S. "Special issue on nonthermal medical/biological treatments using electromagnetic fields and ionized gases", IEEE transactions on plasma science, v.28 no.1, pp.2-5, 2000

[3] Jaeyoung Park, I. Henins, H. W. Herrmann, and G. S. Selwyn, "Discharge phenomena of an atmospheric pressure radio-frequency capacitive plasma source" J. Appl. Phys., 2001, Volume 89, Issue 1, pp. 20-28

[4] Schutze, A., Jeong, J.Y., Babayan, S.E., Park, Jaeyoung, Selwyn, G.S., Hicks, R.F., "The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources", IEEE transactions on plasma science, v.26 no.6, pp.1685-1694, 1998

[5] Janca, J., Zajicková, L., Klíma, M., Slavíček, P., "Diagnostics and Application of the High Frequency Plasma Pencil", Plasma chemistry and plasma processing, v.21 no.4, pp.565-579, 2001

[6] E Stoffels, A J Flikweert, W W Stoffels, and G M W Kroesen, "Plasma needle : a non-destructive atmospheric plasma source for fine surface treatment of (bio) materials", Plasma Sources Science and Technology, 11(2002), 383-388

[7] J. L. Walsh, J. J. Shi, and M. G. Kong, "Contrasting characteristics of pulsed and sinusoidal cold atmospheric plasma jets", Applied Physics Letters, 88, 171501 (2006)

저자 소개



최준영 (崔埭榮)

1975년 10월 16일 생. 2001년 부경대 전기공학과 졸업. 2003년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 부산대 BK사업단 박사 후 연구원 과정

Tel : 051-510-2746
Fax : 051-510-1498
E-mail : plasma@pusan.ac.kr



이호준 (李晞駿)

1966년 10월 14일 생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 부산대 전기공학과 부교수

Tel : 051-510-2301
Fax : 051-513-0212
E-mail : hedo@pusan.ac.kr



김동현 (金東鉉)

1961년 1월 9일 생. 1984년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 부산대 PDP연구소 연구원

Tel : 051-510-1544
Fax : 051-510-1498
E-mail : dhkim11@pusan.ac.kr



이해준 (李海準)

1972년 2월 25일 생. 1994년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업. 1996년 포항공대 물리학과 석사 졸업. 1998년 포항공대 물리학과 박사 졸업(이학박사). 현재 부산대학교 전자전기통신공학부 조교수

Tel : 051-510-3516
Fax : 051-513-0212
E-mail : haejune@pusan.ac.kr



박정후 (朴正后)

1945년 4월 8일 생. 1968년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980~1983년 일본 구주대학 대학원 졸업(공학박). 현재 부산대 공대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수.

Tel : 051-510-2369
Fax : 051-513-0212
E-mail : parkch@pusan.ac.kr