

# Langmuir 프로브 전압의 파형에 따른 아르곤 플라즈마의 전자에너지 분포함수 측정에 관한 연구

論 文  
48C - 5 - 19

## A Study on the measurement of Electron Energy Distribution Function in Ar plasma measured by the waveforms of Langmuir probe voltages

金斗煥\* · 朴正后\*\*  
(Doo-Hwan Kim · Chung-Hoo Park)

**Abstract** - In this paper, we have obtained the Electron Energy Distribution Function(EEDF) in plasma by using two differentiators and investigated the EEDFs by sawtooth and triangle waveform voltages with the working pressures and the positions of single probe. It is found that as the working pressure is decreased, the EEDFs approach to the Maxwellian distribution independent of the waveforms of probe voltage. On the other hand, as the position of probe is moved from the center of the plasma to its edge, the EEDF of sawtooth waveform probe voltage approaches to the Maxwellian distribution, but the EEDF of triangle waveform probe voltage deviates from the Maxwellian distribution.

**Key Words** : Electron Energy Distribution Function(EEDF), Langmuir probe, Sawtooth and triangle waveform probe voltages.

### 1. 서 론

전자에너지 분포함수는 플라즈마 프로세싱에 유용하게 이용되고 있는 파라메타[1]로서 Druyvesteyn 이론식에 의하여 구할 수 있다[2]. Druyvesteyn 이론식을 회로적으로 구현하는 방식으로는 직류전압에 미소한 교류전압을 중첩시켜 이를 플라즈마에 삽입된 프로브에 인가하여 직류전압에 중첩된 교류전압 주파수의 2배에 해당하는 주파수를 가진 프로브 전류를 검출하여 전자에너지 분포함수를 구하는 제2 고조파법이 있다. 이때, 직류전압에 중첩된 교류전압 주파수의 2배에 해당하는 주파수를 가진 프로브 전류(이하부터는 2고조파 전류라 칭함)로써 전자에너지 분포함수를 구할 수 있는 근거는 프로브에 인가된 직류전압 및 교류전압을 함수로 하여 프로브 전류를 테일러 급수전개를 하면 알 수 있다[2-3]. 그런데, 테일러 급수를 전개하기 위해서는 직류전압의 크기에 비해 교류전압의 진폭은 무시할 정도로 작아야 하는 조건을 만족시켜야 한다는 점이다[2-3]. 한편, 2고조파 전류를 프로브 전류로부터 정확히 추출하기 위해서는 밴드 패스 필터(band pass filter) 및 Lock-in 앰프 등이 필요하게 되는데[3] 앞서 언급한 테일러 급수전개와 관련시켜 교류전압의 진폭을 작게하면 밴드 패스 필터 및 Lock-in 앰프가 제대로 동작하지 못한다[4]. 이와같은 문제로 인하여 프로브 전류로부터 2고조파 전류를 정확히 검출하지 못하므로 전자에너지 분포함수를 구할 수 없게 된다. 한편, 연산증폭기들로 이루어진 미분회로로써 프로브 전류를 프로브 전압에 대해 2회 연속 미분을

행하여 전자에너지 분포함수를 구할 수 있는데, 이때 측정상의 문제점은 다음과 같다. 일반적으로 연산증폭기를 이용한 미분회로는 시간영역(time domain)에서 미분을 수행하기 때문에 프로브 전류를 프로브 전압의 영역(voltage domain)에서 2회 연속 미분을 행하여 전자에너지 분포함수를 구할 수 없게 된다. 본 논문에서는 프로브 전압의 파형에 따른 전자에너지 분포함수의 측정에 관한 연구가 거의 없는 실정으므로, 시간적인 선형성을 갖는 톱니파 및 삼각파 전압을 프로브에 인가하여 각 파형에 따른 전자에너지 분포함수를 프로브의 위치, 동작압력등을 변수로 하여 구하고 이들을 비교·검토하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 2회 연속 미분회로

그림 1은 프로브 전류를 프로브 전압의 영역(domain)에서 2회 연속미분을 할 수 있는 미분회로를 나타내고 있다. 이때, 미분기로서 사용되는 연산증폭기는 시간 영역(time domain)에서 미분동작을 하므로 식(1)로 표현되는 프로브전압 영역(probe-voltage domain)에서 2회 연속 미분을 수행해야 하는 Druyvesteyn 식을 전자회로적으로 구현할 수 없는 문제가 생긴다.

$$F(\epsilon) = \frac{2}{N_e e A} \cdot \left( \frac{2m_e V_p}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{d^2 I_p}{dV_p^2} \quad (1)$$

여기서

$F(\epsilon)$  : 전자에너지 분포함수,  $N_e$  : 전자밀도

$e$  : 전자의 전기량,  $A$  : 프로브의 표면적

\* 正 會 員 : 南海專門大學 電氣科 專任講師 · 工博

\*\* 正 會 員 : 釜山大學 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1998년 11월 16일

最終完了 : 1999년 2월 11일

$m_e$  : 전자의 질량,  $V_p$  : 프로브 전압  
 $I_p$  : 프로브 전류

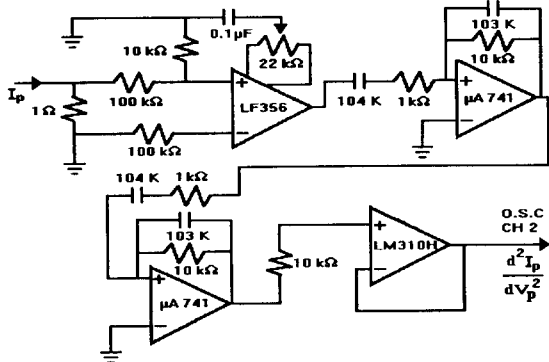


그림 1. 전자에너지 분포함수의 측정을 위한 2회 미분 회로도

Fig. 1. Circuit diagram of the second differentiation for the measurement of electron energy distribution function.

그러나, 프로브에 인가되는 전압이 식(2)와 같이 표현되는 시간적으로 선형성을 가지는 파형이 되면, 이와같은 문제는 해결될 수 있다.

$$V_p = k \cdot t \quad (2)$$

여기서,

$V_p$  : 프로브 전압,  $k$  : 상수

$t$  : 시간

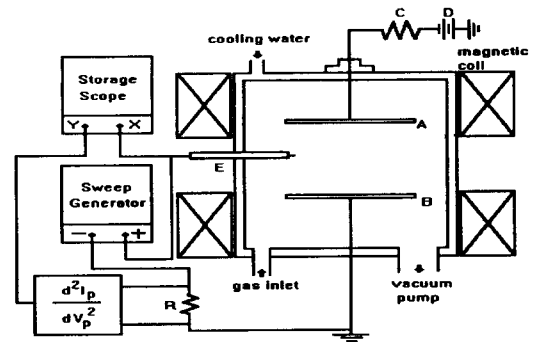
즉, 식(2)를 식(1)에 대입시키면 식(3)이 되고, 식(3)에서 알 수 있듯이 프로브 전류를 시간 영역(time domain)에서 2회 연속 미분을 하더라도 전자에너지 분포함수를 구할 수 있다.

$$F(\varepsilon) = \frac{2}{N_e e A} \cdot \left( \frac{2m_e V_p}{e} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot k^{-2} \cdot \frac{d^2 I_p}{dt^2} \quad (3)$$

### 1.2 전자에너지 분포함수 측정 및 플라즈마 발생장치

그림 2는 전자에너지 분포함수 측정 시스템 및 플라즈마 발생장치의 개략도를 나타내고 있다. 측정에 사용된 프로브의 재질은 텅스텐이며, 프로브의 형상은 원통형(Φ:0.25mm)으로 제작하였고, 플라즈마에 노출되는 프로브의 길이는 2[mm]였다. 프로브 측정값들은 저장형 오실로스코프(storage oscilloscope, VC-6275, 100Mhz)의 X-Y 모드에서 관찰하였다. 이때, 프로브에 인가되는 전압은 오실로스코프의 CH1으로 전송되게 하였고, 연산증폭기에서 연속 2회 미분된 프로브 전류는 오실로스코프의 CH2에 나타나게 하였다. 프로브에는 스위프 전압 발생기(스위프

출력 전압 : ±40V, 출력전류 : 2000mA)로써 톱니파 스위프 전압 및 삼각파 스위프 전압이 인가될 수 있게 하였다. 한편, 방전 전극의 구성은 2개의 원판상 황동전극을 서로 마주보게 배치한 것으로서 직경 5[cm], 전극 간격을 5[cm]로 설치하였고, 전극간에는 직류전압을 인가하여 직류 아르곤 플라즈마가 형성되도록 하였다. 플라즈마에 가해지는 자계는 진공조 외부에 상·하부 2개의 코일군으로 나누어 각각 3000회로 감아 코일에 흐르는 전류를 가변시켜 0 ~ 1000[Gauss]까지 제어할 수 있도록 하였다. 발생된 플라즈마에 의한 진공조 내부의 온도 상승을 억제하기 위해 진공조를 2중 수냉벽으로 하였다. 진공조 내부의 진공도는 10<sup>-6</sup> [Torr]까지 초기 배기한 후, MFC(Mass Flow Controller)로써 동작 가스 유량을 조절하였다.



A : 음극; B : 양극; C : 방전 안정용 저항; D : 전원  
 E : 싱글 프로브; R : 프로브 전류 검출용 저항

그림 2. 플라즈마 발생장치 및 측정시스템 개략도

Fig. 2. Schematic diagram of the plasma generation

### 3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 방전전압 550[V], 자계 120[Gauss]인 조건에서 동작압력을 100[mTorr], 80[mTorr], 60[mTorr], 40[mTorr]로 각각 변화시킨 상태에서 프로브에 톱니파 전압 및 삼각파 전압을 인가하여 얻어진 전자에너지 분포함수를 나타내고 있다. 그림 A, B, C, D 등은 동작압력이 100[mTorr], 80[mTorr], 60[mTorr], 40[mTorr]로 각각 변화시킨 상태에서 톱니파 프로브 전압에 의해 측정된 전자에너지 분포함수를 나타내고 있으며 그림 E, F, G, H 등은 이상과 같은 동일한 동작압력의 변화에서 삼각파 프로브 전압으로 측정된 전자에너지 분포함수를 보여주고 있다.

그림 A, B, C, D 및 그림 E, F, G, H 등에서 알 수 있듯이 압력이 감소할수록 전자에너지 분포함수는 맥스웰 분포에 가까워지는 경향을 보이고 있는데 이와같은 경향은 다음과 같이 생각할 수 있다. 동작가스의 압력이 저하할수록 진공조 벽으로 전자의 확산이 증대되고(전자의 소실이 증대되고), 이로인해 전자, 이온 및 중성입자 등으로 구성되어 전체적으로 전기적 중성이 유지되는 전리기체 상태, 즉 플라즈마는 깨어지게 된다. 따라서 플라즈마를 유지하기 위해서 전자 온도는 증가하여 전리율을

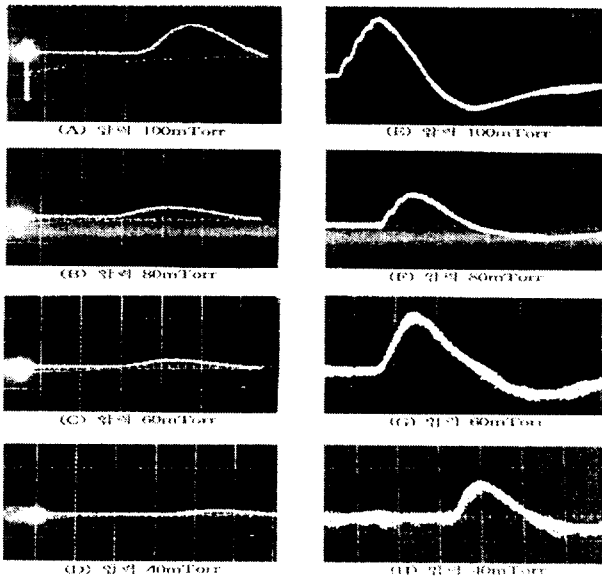


그림. 3. 동작압력에 따른 전자에너지 분포함수  
(그림 A, B, C, D : 텀니파 프로브 전압에 의한 전자 에너지 분포함수, X-축:10V/div., Y-축: arbitrary unit ; 그림 E, F, G, H : 삼각파 프로브 전압에 의한 전자 에너지 분포함수, X-축: 5V/div., Y-축: arbitrary unit)

Fig. 3. Energy distribution function with the working pressures

상승시켜야 한다[5]. 이때, 전자온도의 상승은 전자들 상호간에 탄성충돌을 하게 되어 전자에너지 분포함수는 동작가스의 압력이 저하할수록 맥스웰 분포에 가까워 지는 경향을 보이는 것이라 생각된다[6-7]. 한편, 전자에너지 분포함수에서의 최대치, 영점(X-축과 전자에너지 분포함수와의 교차점) 등은 플라즈마 공간전위의 결정에 이용되는데[8-9] 본 연구에서는 텀니파 프로브 전압에 의해 측정된 전자에너지 분포함수 A, B, C, D에서는 최대치에 대응한 프로브 전압을 플라즈마 공간전위로 하고, 삼각파 프로브 인가 전압으로 측정된 전자에너지 분포함수 E, F, G, H에서는 최대치와 최소치 사이에서 X-축과 전자에너지 분포함수와의 교차점, 즉 영점에 대응한 프로브 전압을 플라즈마 공간전위로 했을 때, 이들의 플라즈마 공간전위는 거의 일치함을 알 수 있었다. 아울러 전자에너지 분포함수로부터 플라즈마 파라메타인 전자온도 및 전자밀도 등은 다음과 같이 구할 수 있다. 전자온도는 전자에너지 분포함수의 기울기로부터 구할 수 있으며[10-12], 전자밀도는 전자에너지 분포함수를 이용하여 식(4)와 같이 구할 수 있는데, 식(4)는 전자에너지 분포함수와 프로브 전압축(X-축)과 이루는 면적을 의미한다[7].

$$N_e = \int F(\epsilon) d\epsilon \quad (4)$$

여기서,

$N_e$  : 전자밀도  $F(\epsilon)$  : 전자에너지 분포함수

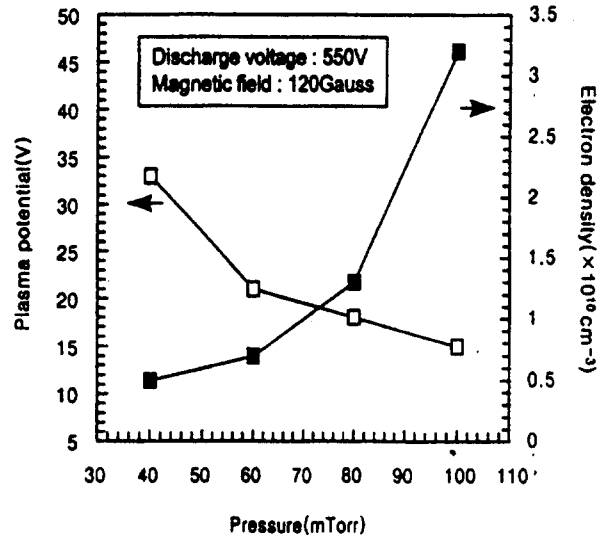


그림. 4. 동작압력에 따른 플라즈마 공간전위 및 전자밀도  
Fig. 4. Plasma potentials and electron densities with the working gas pressures

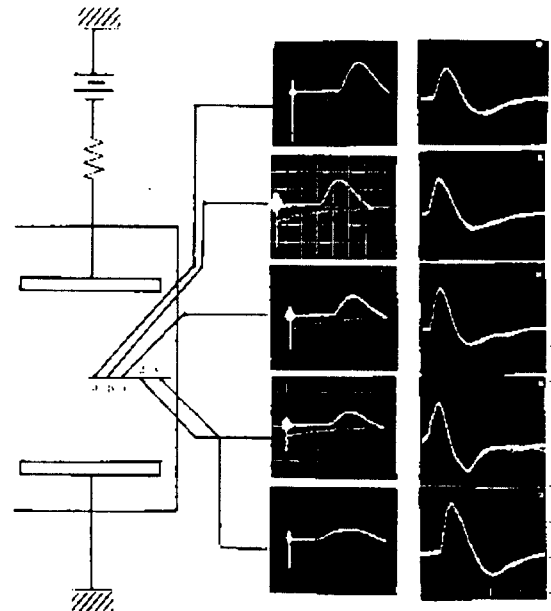


그림. 5. 프로브의 위치에 따른 전자에너지 분포함수  
(좌측그림 : 텀니파 프로브 전압에 의한 전자에너지 분포함수, X-축 10V/div., Y-축: arbitrary unit; 우측 그림 : 삼각파 프로브 전압에 의한 전자에너지 분포함수, X-축: 5V/div., Y-축: arbitrary unit)

Fig. 5. Electron energy distribution function with the positions of single probe.

그림 4에 동작압력의 변화에 따른 플라즈마 공간전위와 아울러 전자밀도를 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 동작압력이 감소할수록 공간전위는 증가하였고, 전자밀도는 감소하였다. 동작압력이 감소할수록 플라즈마의 공간전위가 증가하는 것은 전자들의 진공조 벽으로 향한 확산이 압력의 감소에 따라 증가하게 되고, 이에 대하여 플라즈마는 전기적으로 중성을 유지하기 위하여(전자의 확산을 억제하기 위하여) 플라즈마의 공간전위는 더욱 포지티브(positive)해지기 때문이라 생각된다[13]. 그림 5는 방전전압 530[V], 자계 170[Gauss], 압력 [100mTorr]인 조건에서 프로브 위치를 0[cm](a점), 1[cm](b점), 2[cm](c점), 3[cm](d점), 4[cm](e점) 지점의 순으로 변화시킨 상태에서 얻어진 톱니파 프로브 전압에 따른 전자에너지 분포함수(그림 5에서 좌측 그림들) 및 삼각파 프로브 전압에 따른 전자에너지 분포함수(그림 5에서 우측 그림들) 등의 프로필(profile)을 나타내고 있다. 그림 5의 좌측 그림들에서 알 수 있듯이 프로브의 위치를 0[cm](a점)지점부터 3[cm](d점)지점으로 변화시킴에 따라 전자에너지 분포함수는 맥스웰 분포에 가까운 경향을 보이고 있으나 4[cm](e점)지점에서의 전자에너지 분포함수는 맥스웰 분포를 벗어나고 있다. 한편, 우측의 삼각파 프로브 전압에 따른 전자에너지 분포함수는 프로브의 위치 변화에 대해서 톱니파 프로브 전압에 의한 경우와는 달리 맥스웰 분포에서 벗어나 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서, 프로브의 위치 변화에 따른 전자에너지 분포함수는 프로브 전압의 파형이 삼각파 보다는 톱니파 일때, 맥스웰 분포에 가까운 특성을 나타냄을 알 수 있었다.

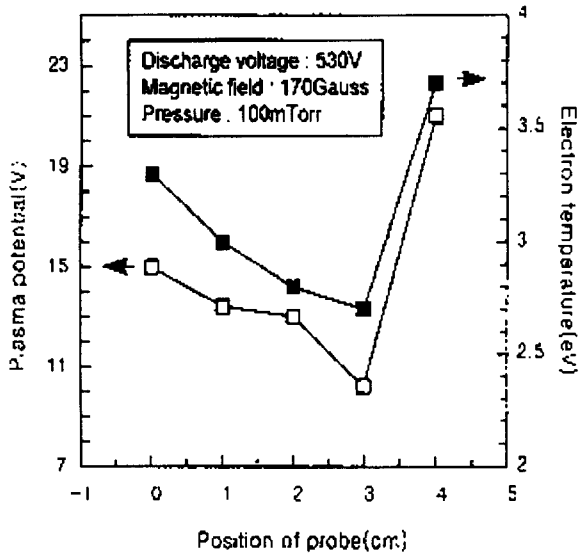


그림 6. 프로브 위치 변화에 따른 플라즈마 공간전위 및 전자온도

Fig. 6. Plasma potentials and electron temperatures with the positions of single probe

그림 6은 방전전압 530[V], 자계 170[Gauss], 압력 100[mTorr]인 조건에서 프로브 위치의 변화에 따른 플라즈마 공간전위와 전자온도를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 프로브의 위치를 0[cm](a점), 1[cm](b점), 2[cm](c점), 3[cm](d점), 4[cm](e점) 지점의 순으로 변화시킬수록 플라즈마 공간전위는 감소하다가, 4[cm](e점)지점에서는 증가하는 경향을 보여주고 있

다. 아울러 전자온도는 3[cm](d점)까지는 감소하다가 4[cm](e점) 지점에서는 상당히 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 프로브의 위치에 대한 플라즈마 공간전위의 변화, 즉 플라즈마의 내부전계가 3[cm](d점)지점까지는 완만히 감소하다 4[cm](e점)지점에서 증가하기 때문이라 생각된다[14].

#### 4. 결 론

본 연구에서는 싱글 프로브에 인가된 전압에 대해 프로브 전류를 2회 미분하여 전자에너지 분포함수를 구하는 Druyvesteyn 식을 만족시키기 위하여 프로브 전압을 선형화하여 2회 연속 미분을 회로적으로 구현한 후, 프로브 전압의 파형이 톱니파 및 삼각파일때, 동작압력의 변화와 프로브 위치의 변화에 따라 측정된 전자에너지 분포함수를 검토한 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

전자에너지 분포함수에서 플라즈마 공간전위는 프로브 전압이 톱니파 일때는 전자에너지 분포함수의 최대치에 해당하는 프로브 전압과 프로브 전압이 삼각파 일때는 전자에너지 분포함수의 영점에 해당하는 프로브 전압을 플라즈마 공간전위로 했을 때, 플라즈마 공간전위는 거의 일치함을 알 수 있었다. 아울러 동작압력이 감소할수록 전자에너지 분포함수는 프로브 전압의 파형에 관계없이 거의 맥스웰 분포에 가까워 지는 경향을 보여주었다. 이때, 플라즈마 공간전위는 증가하는 반면에 전자밀도는 감소하였다. 한편, 프로브의 위치가 플라즈마의 중심부로부터 멀어질수록, 전자에너지 분포함수는 프로브 전압이 톱니파 일때는 맥스웰 분포에 가까워지는 경향을 보인 반면에 프로브 전압이 삼각파 일때의 전자에너지 분포함수는 톱니파 프로브 전압에 의한 경우와는 달리 맥스웰 분포에서 벗어나 있음을 알 수 있었다. 아울러 프로브의 위치가 플라즈마의 중심부로부터 멀어질수록 플라즈마 공간전위는 감소하다가, 증가하는 경향을 보여주었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 이 시 우 역, "C. V. D 핸드북", 반도 출판사, 제 4 장, 1993.
- [2] C. H. Chen et al, "Measurement of electron distribution function in a cesium plasma" J. Appl. Phys., Vol. 43, No. 11, pp.4570-4573, Nov., 1972.
- [3] C. M. Ferreir, "Microwave Discharges", Pleum Press, pp.306-307, 1993.
- [4] J. I. Fernandez Palop et al, "A new smoothing method for obtaing the electron energy distribution function in plasmas by the numerical differentiation of the I-V probe characteristic", Rev. Sci. Instrum., Vol. 66, No 9, pp.4625-4636, September, 1995.
- [5] K. Shirai et al, "Electric Probe Measurement in an ECR Plasma CVD Apparatus", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 28, No. 5, pp. 897-902, May, 1989.
- [6] D. L. Smith, "Thin Film Deposition", McGraw-Hill, Inc., pp.460-462, 1995.
- [7] M. S. Barnes et al, "Electron energy distribution function

measurements in a planar inductive oxygen radio frequency glow discharge", Appl. Phys. Lett., Vol. 62, No. 21, pp.2622-2624, May, 1993.

- [8] 일본전기학회 기술보고(II부), 제152호, pp.23-26.
- [9] E. Tatarova and D. Zamfirov, "A radially resolved experimental investigation of the electron energy distribution function in a microwave discharge sustained by propagating surface waves", J. Phys. D: Appl. phys., Vol 28, pp.1354-1361, 1995.
- [10] D. N. Ruzic, AVS Monograph series, Ed. W. Weed, pp.51-56, 1994.
- [11] P. Spatenka and V. Brunnhofer, "A new simple method for suppression of influence of rf plasma oscillations during Langmuir probe measurements", Meas. Sci. Technol., Vol. 7, pp.1065-1067, 1996.
- [12] A. A. Kudryavtsev and A. I. Ledyankin, "On the Electron Vibrational Temperature in a Nitrogen Afterglow Plasma", Physica Scripta., Vol 53, pp.597-602, 1996.
- [13] J. L. Vossen and W. Kern Eds., "Thin Film Processes II", Academic Press, Inc., 1991, pp.14-15.
- [14] J. A. O' Neill et al, "Optical Ion Energy Measurements in a Radio-Frequency-Induction Plasma Source", J. Appl. Phys., Vol. 73, No 4, pp.1621-1626, February, 1993.

저 자 소 개



**김 두 환 (金斗煥)**  
 1961년 4월 13일생. 1988년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 남해전문대 전기과 전임강사

Tel : (0594) 860-5354



**박 정 후 (朴正后)**  
 1945년 4월 8일생. 1968년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1980-1983년 일본 큐우슈우 대학 대학원 졸업(공학). 현재 부산대 전기공학과 교수.