

e^- -CF₄산란중에서 전자군의 확산계수 및 에너지분포함수 연구



Analysis of Electron Swarm Diffusion Coefficients and Energy Distribution Function in e^- -CF₄ Scattering

하성철*, 임상원*

(Sung-Chul Ha, Sang-Won Lim)

Abstract

In this paper, the behavior of electron swarm parameters and energy distribution function of the discharge under high E/N condition in e^- -CF₄ gas have been analysed over the E/N range from 1~300(Td) by the MCS and BEq methods using set of electron collision cross section determined by the authors. The swarm parameters and energy distribution function have been calculated for the pulsed Townsend, steady-state Townsend and Time of Flight methods. The results gained that the value of electron swarm parameters such as the electron drift velocity, the electron ionization and attachment coefficients and longitudinal diffusion coefficients in agreement with the experimental and theoretical data for a range of E/N. The electron energy distribution function has been explained and analysed in e^- -CF₄ at E/N : 5, 10, 100, 200, 300(Td) for a case of the equilibrium region in the mean electron energy and respective set of electron collision cross sections. The validity of the results has been confirmed by TOF and SST methods.

Key words(중요용어) : Electron swarm parameters(전자군파라미터), Steady-state Townsend (정상 타운젠트), Electron energy distribution function(전자에너지 분포함수), Longitudinal diffusion coefficients(종방향확산계수)

1. 서 론

전리기체는 대단히 많은 하전입자와 중성원자, 분자로 구성되며 전자, 이온 등의 하전입자와 중성 기체원자 또는 분자가 공존할 때에는 이들 하전입자 상호간의 충돌작용에 의하여 이동, 확산 등의 거시적 현상이 나타난다. 이들의 현상들을 정량적으로 해석하기 위해서는 충돌현상과 전자에너지 분포함수가 기초가 되며 이에 대한 이론적, 실험적 연구가 활발히 이루어져 왔다. 그러나 이들 응용분야의 확충과 효율개선 및 물성적 현상의 명확한 규명을 위하여 면밀한 연구가 요구되고 있다.

전계가 인가되고 있는 기체방전공간에서 전자는 가속 비행하면서 중성분자와 충돌하고 전자에너지 분포가 변화하여 최후에는 일정한 에너지분포를 이루는 공간을 형성한다. 또한 전자에너지분포함수는 전자 개개의 에너지에 대한 확률밀도를 나타내는 물리량으로 전자와 분자간의 각종 충돌단면적과 방전현상에 있어서 전자수송특성에 직접적으로 연관되는 역할을 하며 극히 기초적인 중요한 물리량이다. 이때 전리된 중성입자와 더불어 하전입자(전자, 이온)는 여러종류의 에너지 성분을 가지며 기체분자가 열평형상태에 있을 때 에너지의 크기와 온도에 의존하는 방전공간에서 등방적인 Maxwell의 에너지 분포를 나타낸다. 그리고 하전입자가 기체의 수송특성에 본질적인 영향을 미치는 것은 정·부 하전입자의 상호작용에 의해서 기체밀도가 전기적으로 중성상태를 유지할 때와 입자의

* : 동국대학교 전기공학과
접수일자 : 1997년 3월 3일
심사완료 : 1997년 3월 28일

평균에너지가 전리에너지 부근에 이르면 기체는 실질적으로 완전 전리 플라즈마로 된다. 종래에는 기체중의 하전입자수가 시간에 따라 변하지 않는 입자수 보존의 상태를 주로 취급하여 왔으나 전리, 부착작용이 일어나게 되면 기체중의 하전입자의 수는 비보존적이 되므로 이들 작용이 하전입자군의 에너지분포함수와 수송특성에 미치는 영향을 고려해야 할 필요가 있다.

CF₄(Tetrafluoromethane)가스는 반도체 디바이스 제조프로세싱의 플라즈마 에칭(plasma etching)에 많이 이용되고 있다.¹⁾ 그리고 이 기체는 전극 등의 고체표면에 흡착하기 쉬운 성질과 전자부착성 때문에 높은 절연내력을 가지고 있으며 방전공간에서 전계로 인하여 해리된 하전입자가 활성화(radical)한 분자로 존재한다.²⁾ 또한 비탄성충돌 때문에 전자에너지를 저하시켜 절연내력이 향상되고 냉각효과도 크다.³⁾ CF₄가스는 전자에너지가 15(eV) 부근에서 부착단면적을 가지고 있고 전계가 약 60~100(Td) 부근에서 부착충돌주파수가 가장 크므로 전자수가 시간과 더불어 감소하는 전자 부정가스이다. 특히 이 가스의 운동량변환단면적은 전자에너지가 0.1~0.8(eV)부근에서 깊은 Ramsauer minimum을 갖고 있으므로 이 때문에 큰 진동여기단면적이 존재하므로 낮은 E/N영역에서 2항 근사 해석으로 단면적 Set의 결정은 어려우므로 본 연구에서는 넓은 영역의 E/N(Td)범위에서 전자에너지분포함수와 각종 전자군파라미터(W, ND_L, α/N, η/N, α-η/N, ε)의 이론적인 몬테카를로 시뮬레이션(MCS)과 볼츠만 방정식법(BEq)의 해석결과와 실험적 결과를 비교 검토하여 MCS기법의 타당성을 확인한다. 그리고 전하이동속도의 변화에 따른 부구배와 전기전도특성의 영향을 고찰한다.

2. 해석 방법

기체중에서 운동하고있는 하전입자군의 수송계수를 해석하는 방법에는 비행시간법(Time of Flight method), 펄스 타운젠트법(Pulse Townsend method) 및 정상 타운젠트법(Steady State Townsend method)등이 있다.⁴⁾ 펄스 타운젠트법은 하전입자군의 성질을 구성입자의 위치에 관계없이 시간간의 함수로써 파악하는 것이며 정상 타운젠트법은 평형평판 간극의 외부에서 음극에 자외선을 조사하는 방법에 의하여 연속적으로 초기전자를 공급하여 간극 내에서 정상입자류를 형성시킨 후 간극길이만의 함수로서 하전입자군의 수송계수를 관측하는 방법이다. 그러나 비행시간법은 하전

입자군의 성장을 위치, 시간의 함수로서 파악하는 관측법으로 입자수 비보존의 경우에도 하전입자군의 성질을 정확하게 구할수 있는 장점을 가지고 있다. 위에서 서술한 바와같이 전자군을 구성하는 전체의 전자를 해석하기 위해서는 어떤 지정한 전자를 추적하는 것으로써 먼저 기체의 종류, 압력, 밀도, 각종 충돌단면적, 전계, 전자수로 전자에너지 분포를 결정한다. 그리고 경계조건으로 음극, 양극의 반사계수와 전극간거리 등을 설정한다. 먼저 1개의 전자에 의하여 기체분자와 충돌을 반복하면서 전자사태를 형성하고 그 궤도가 양극에 도달한다. 또한 전리 및 부착작용에 의해 생긴 전자는 그 시점에 대한 에너지, 위치 및 속도 등의 값을 초기전극간 분할수(Sampling point : 20), 초기난수(Initial random number : 13)를 이용하여 Δℓ법으로 전자군파라미터를 MCS법으로 계산한다.^{5,6)} 그리고 볼츠만법은 Philip E. Luft의 Backward prolongation⁷⁾에 의해 전자에너지 분포함수를 $\int_0^\infty \epsilon^{1/2} f(\epsilon) d\epsilon = 1$ 에 의해 구한 $f(\epsilon)$ 값을 이용하여 각종 전자군 수송계수를 Sparc Workstation SS-20으로 계산한다. 한편 MCS 및 BEq data중 한 예를 다음과 같이 나타내었다.

표 1. 전자군의 몬테카를로 시뮬레이션 결과
Table 1. The Result of Monte Carlo Simulation of Electrons.

The Result of Monte Carlo Simulation of Electrons							
Mixture : cf4.dat /cf4.dat							
Mix Ratio : 50.0000/ 50.0000							
E/N = 100.000 (Td)							
Pressure = 1.000 (torr)							
Max Period to Track = 0.100(us)							
No. of Sampling Points = 20							
No. of Initial Electrons = 3000							
Initial RDN = 13							
NN	Time	Sample	ZZ	R*R	DLT	Energy	
1	0.5000E-08	3000	0.1313E-02	0.1470E-05	0.4030E-06	0.3794E+01	
2	0.1000E-07	3000	0.1934E-02	0.4082E-05	0.8449E-06	0.4235E+01	
3	0.1500E-07	3000	0.2541E-02	0.6200E-05	0.1492E-05	0.4551E+01	
4	0.2000E-07	3000	0.3148E-02	0.8465E-05	0.1948E-05	0.4599E+01	
5	0.2500E-07	3000	0.3694E-02	0.1065E-04	0.2430E-05	0.4445E+01	
6	0.3000E-07	3000	0.4300E-02	0.1376E-04	0.2838E-05	0.4605E+01	
7	0.3500E-07	3000	0.4833E-02	0.1691E-04	0.3268E-05	0.4592E+01	
8	0.4000E-07	3000	0.5317E-02	0.2154E-04	0.3832E-05	0.4281E+01	
9	0.4500E-07	3000	0.5888E-02	0.2411E-04	0.4662E-05	0.4748E+01	
10	0.5000E-07	3000	0.6542E-02	0.2571E-04	0.5169E-05	0.4695E+01	
11	0.5500E-07	3000	0.7131E-02	0.2647E-04	0.3425E-04	0.4627E+01	
12	0.6000E-07	3000	0.7619E-02	0.2776E-04	0.3316E-04	0.4422E+01	
13	0.6500E-07	3000	0.8109E-02	0.3067E-04	0.3249E-04	0.4374E+01	
14	0.7000E-07	3000	0.8648E-02	0.3158E-04	0.3219E-04	0.4638E+01	
15	0.7500E-07	3000	0.9081E-02	0.3246E-04	0.3144E-04	0.4087E+01	
16	0.8000E-07	3000	0.9614E-02	0.3599E-04	0.3106E-04	0.4233E+01	
17	0.8500E-07	3000	0.1009E-01	0.3857E-04	0.3091E-04	0.4157E+01	
18	0.9000E-07	3017	0.1070E-01	0.4126E-04	0.3263E-04	0.4637E+01	
19	0.9500E-07	3017	0.1123E-01	0.4306E-04	0.3198E-04	0.4551E+01	
20	0.1000E-06	3017	0.1182E-01	0.4498E-04	0.3283E-04	0.4644E+01	

표 2. 전자군의 볼츠만 방정식 결과
 Table 2. The Results of Boltzmann equation of Electrons.

```

    **** Boltzmann Equation Analysis ( TSSMIX.FOR ) ****
    cf4.dat / cf4.dat Mixture
    Mix Ratio cf4.dat : cf4.dat =100.000 : 0.000

    E/N = 100.0000 (Td) Temperature = 300.0 (K)
    No. of Cross Section Included cf4.dat : 8 cf4.dat : 8
    Maximum Energy for Distribution Function = 32.400 (eV)
    Energy Separation = 0.1080E-01 (eV)
    No. of Points for Distribution Function = 3000

    *** Electron Swarm Parameters ***
    | SST |
    Mean Energy = 0.449148E+01 (eV)
    Drift Velocity (Ws) = 0.108098E+08 (cm/s)
    Diffusion Modified Drift Velocity (Vd) = 0.108029E+08 (cm/s)
    Ds = 0.142779E+07 (cm2/s)
    Alpha = 0.480379E-02 (1/cm)
    Alpha/N = 0.135881E-18 (cm2)
    Collision Frequency (1/s)
    "cf4.dat"
    1 0.21262E+10
    2 0.44443E+07
    3 0.30533E+08
    4 0.17397E+10
    5 0.25605E+07
    6 0.11430E+08
    7 0.82597E+06
    8 0.51895E+05

    Energy Balance
    Loss Gain %
    0 0.3819E+09 0.3820E+09 99.97
    1 -1.316E+07 -1.316E+07 99.99
    2 0.1450E+04 0.1450E+04 100.00
    3 -1.110E+01 -1.110E+01 100.02
    
```

전계가 상승함에 따라 전자에너지분포함수가 높은 에너지 쪽으로 이동할 때 전자에너지분포에 해당하는 충돌단면적의 범위도 높은 에너지 방향으로 이동한다. 이와같이 전계의 증가로 높은 에너지 영역의 충돌단면적의 값을 이용하여 전자에너지분포함수(E/N : 5, 10, 100, 200, 300Td)와 전자군과 라미터(W, ND_L, α/N, η/N, α-η/N, ε̄)를 MCS법과 BEq법으로 해석을 하였다.

3. 전자의 충돌단면적

기체분자에 대한 전자의 충돌단면적은 전자의 에너지에 의해서 변화한다. 따라서 충돌 입자간의 상호작용으로 기체분자의 여기, 해리, 이온화 등의 반응으로 여기단면적, 해리단면적, 이온화단면적 등으로 나타내며 전충돌단면적은 개개의 반응과정의 합으로 나타낸다. 본 연구에 이용한 CF₄의 전자충돌단면적은 운동량 변환단면적(Q_m), 진동 여기단면적(Q_{v1}, Q_{v2}), 전자 부착단면적(Q_a), 전자 여기단면적(Q_{ex}), 해리단면적(Q_d) 및 전리단면적(Q_i)등

으로 구성되어 있다.

이 CF₄의 전자 충돌단면적은 운동량 변환단면적(Q_m)의 0.1~0.8(eV) 범위에서 Ramsauer minimum을 가지며 큰 진동 여기단면적(Q_{v1}, Q_{v2})의 threshold 에너지의 값은 0.18(eV), 0.08(eV)이며 전자 부착단면적(Q_a)의 threshold 에너지의 값은 5(eV)이다. 전자여기(Q_{ex})의 threshold 에너지(약 7.5eV) 부근에 비교적 큰 부착단면적을 가지고 이것이 전자부성특성을 나타내는 원인이 된다. 그리고 해리단면적(Q_d), 전리단면적(Q_i)등으로 구성되어 있는 비탄성 충돌단면적의 값은 Y. Nakamura의 값¹⁾을 이용하여 계산하였고 그림1에 나타내었다.

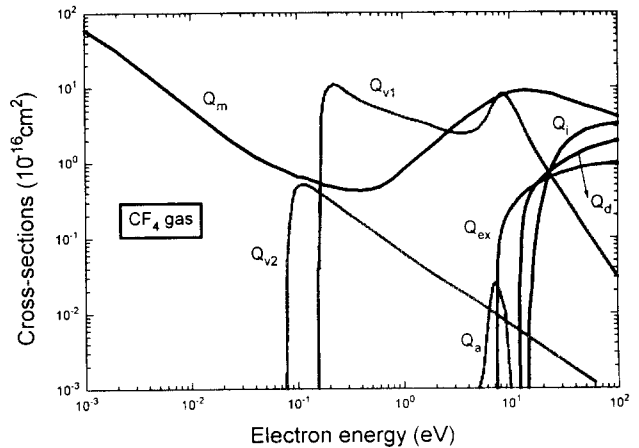


그림 1. CF₄ 가스의 전자충돌 단면적
 Fig. 1. The collision cross sections of electrons in CF₄ gas.

4. 결과 및 고찰

순수 CF₄가스의 전자수송 Parameter의 결과를 MCS법과 볼츠만법을 통하여 고찰하였다. 그림2의 전자이동속도(W)는 E/N : 1~300(Td)범위에서 Y. Nakamura(1988)¹⁾, M. Hayashi(1986)¹¹⁾의 실측치와 이론치를 비교하였다.

CF₄가스의 운동량변환단면적은 0.1~0.8(eV) 부근에 넓은 Ramsauer minimum과 여기에 커다란 진동 여기단면적을 가짐으로써 진동여기충돌에 의해서 낮은 에너지대의 전자가 많기 때문에 전자에너지의 커다란 순환이 발생하고 완화시간의 감소 효과로 E/N : 70~300(Td)영역에서 drift속도는 상승되며 이동도에 부구배(NDC : Negative Differential Conductivity)의 특성을 나타내었다.

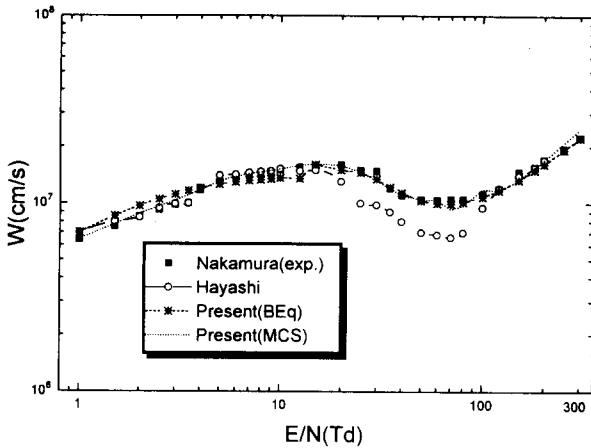


그림 2. CF₄ 가스중에서 전자이동속도
Fig. 2. The drift velocity of electrons in CF₄ gas.

본 연구에서 MCS와 BEq로 계산된 이동속도는 거의 일치하였고 E/N : 20~100(Td) 범위에서의 실험치는 큰 차이가 나타났다. 이것은 Y. Nakamura와 M. Hayashi의 단면적중 Q_m의 차이때문이며 M. Hayashi의 Q_m이 더 깊은 Ramsauer minimum을 가지고 있기 때문이다. 또한 CF₄가스가 갖는 큰 진동 여기단면적과 운동량 변환단면적의 작용으로 나타나는 에너지분포의 비등방성에 의한 2항 근사해석의 오차와 전자부성특성이 현저하게 나타난 영역에서 drift 속도의 측정방법과 해석의 문제로 인하여 오차가 발생된다고 생각된다.

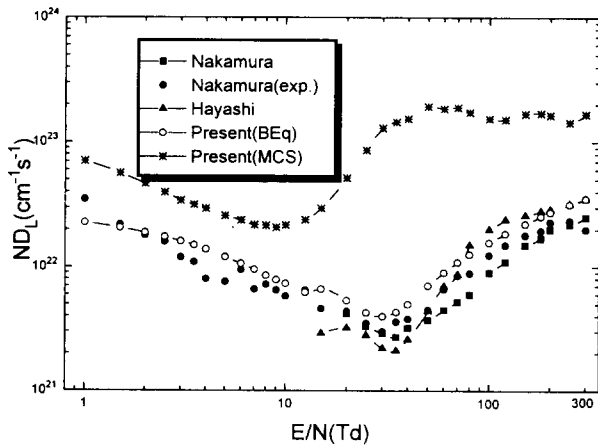


그림 3. CF₄ 가스중에서 확산계수
Fig. 3. The diffusion coefficients in CF₄ gas.

그림3의 종방향 확산계수는 가스분자수 밀도(N)와의 곱 ND_L을 E/N(Td)의 함수로 나타내었다.

본 연구에서는 Y. Nakamura의 전자 충돌단면적을 이용하여 MCS와 BEq으로 계산한 ND_L의 결과와 비교하고 Y. Nakamura의 계산값 및 실험값⁸⁾과 M. Hayashi의 계산값⁹⁾를 나타내었다. 여기에서 MCS로 계산된 결과는 넓은 E/N(Td)범위에서 실험값과 상당한 차이가 나타나고 있다. Y. Nakamura의 단면적을 이용하여 MCS에 의해 계산된 값은 약 E/N=35(Td)에서 실험값보다도 1.4×10²³[cm²s⁻¹]정도 차이가 나며 이는 진동 여기단면적(Q_{v1})의 공명 peak가 작기 때문으로 생각된다. 또한 ND_L은 E/N(Td)의 증가에 따른 의존성이 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. CF₄가스중의 전자확산계수는 이동속도, 전리 및 부착계수의 영향으로 하전입자 밀도의 공간적구배와 전계가 공전하는 공간내에서 하전입자의 거시적운동이 일어나고 비평형상태의 전자에너지분포의 비등방성이 나타난 것으로 생각된다. 또한 E/N에 따른 ND_L의 변화가 E/N중간에서 급하게 가라앉는 특징을 보인다. 비슷한 특징이 Ar에서도 발견되며 이러한 특징은 Q_m에 Ramsauer minimum을 가지고 있는 가스들의 독특한 특징으로 여겨진다.

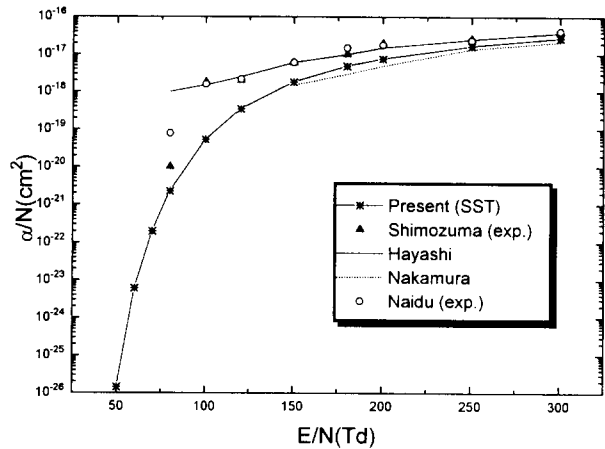


그림 4. CF₄ 가스중에서 전리계수
Fig. 4. The ionization coefficients in CF₄ gas.

그림 4, 5, 6에 나타난 바와 같이 볼츠만법의 SST로 계산한 전리계수, 부착계수 및 실효전리계수를 각각 E/N(Td)의 함수로 나타내었다. 전자가 전계중에서 가속되어 전자의 운동에너지가 기체의 전리에너지를 넘으면 어떤 전리확률을 가지고 기체분자를 전리한다. 본 연구에서 계산된 값은 Y. Nakamura, M. Hayashi의 계산값과 Shimosuma, Naidu 및 Dutton의 실험값으로 비교 검토하였

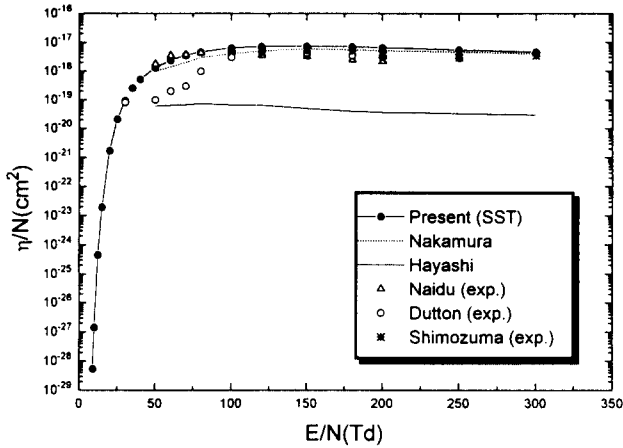


그림 5. CF₄ 가스중에서 부착계수
Fig. 5. The attachment coefficients in CF₄ gas.

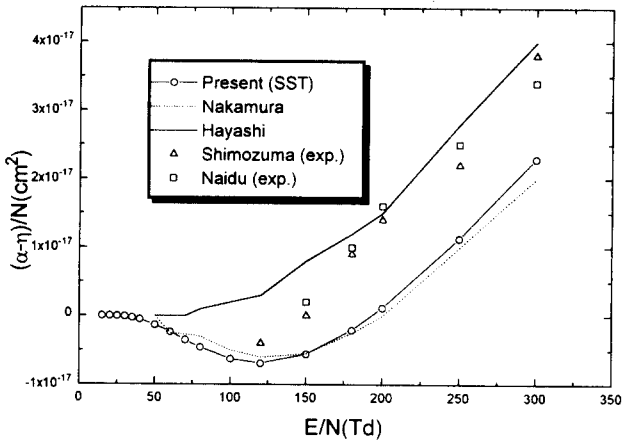


그림 6. CF₄ 가스중에서 실효전리계수
Fig. 6. The effective ionization coefficients in CF₄ gas.

다.¹⁰⁾ 전자의 충돌 전리계수의 크기는 E/N(Td)의 증감에 따라 증감의 변화가 정량적으로 나타났으며 전리전압이 높은 어느값 이상에서는 전리에너지의 상승으로 기체 방전현상의 영향을 미치는 것으로 생각된다. 한편 전리에 의하여 발생한 전자는 중성분자에 부착하여 부이온을 형성시켜 전리능력을 감소시킨다. 낮은 E/N(Td)에서는 부착계수의 값은 감소하였으나 높은 E/N(Td)영역에서는 거의 일정한 경향을 나타내었다. 즉 전자의 에너지가 증가하면 비탄성 충돌에 의한 손실계수는 증대하고 전자의 에너지를 저하시키므로 기체의 절연력은 감소되는 것으로 생각된다. 그리고 실효전리계수는 전자가 전계로부터 큰 에너지를 얻게되면 부착이

어렵다. 한편 본 연구에서는 E/N : 50~200(Td)영역에서 $\alpha < \eta$ 되므로 강한 부착특성을 나타내었다. E/N : 200Td 이상에서 $\alpha - \eta/N$ 은 +값을 얻으므로 충돌전리가 효과적으로 이루어지며 그 이하에서는 이루어지지 않는다고 생각된다.

전자의 평균에너지($\bar{\epsilon}$)는 평행평판 전극간거리(cm), E/N(Td) 및 초기전자수(수천개)를 MCS법으로 전자를 추적한 값을 그림7에 나타내었다.

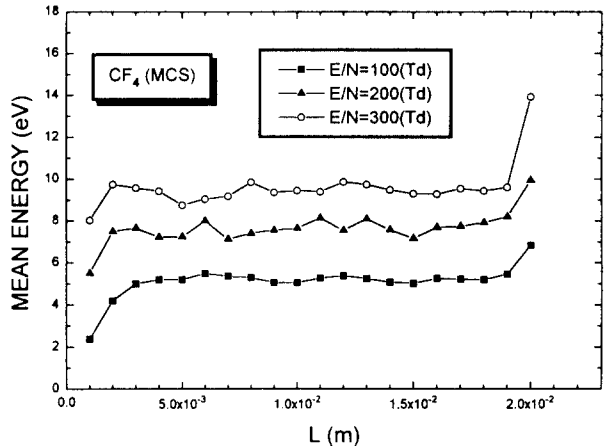


그림 7. CF₄ 가스중에서 전자의 평균에너지
Fig. 7. The mean energy of electrons in CF₄ gas.

전자의 평균에너지는 전극간거리 및 시간의 함수로써 계산되는 전자에너지분포, 전자이동속도 등에 관계되는 물리량이다. 따라서 전극간 거리와 E/N : 100, 200, 300(Td)의 평균에너지 변화량은 샘플링의 차에 의하여 음극과 양극에 가까운 영역에서는 증가하고 그의 영역에서는 거의 평형상태의 에너지 값을 나타내었다.

그림8, 9, 10, 11은 전자군파라미터에 직접 관련되는 물리량인 전자에너지분포 $f(\epsilon)$ 를 E/N=5, 10, 100, 200, 300(Td)에 대하여 나타내었다. 전자가 전계에 의하여 운동할 때 Sample(14, 16, 10), 거리(1.4, 1.6, 1cm), 평균에너지(5, 7.6, 9.4eV)범위에서 MCS법으로 전자를 추적하여 나타난 전자에너지분포 $f(\epsilon)$ 는 2항근사식에 의한 BEq와 SST의 계산값과 전반적으로 큰 차이를 나타내었다.

$f(\epsilon)$ 의 초기값에서는 전자에너지가 증가하고 높은 전자에너지 측에서는 감소하는 경향이 나타났다. 이와같은 현상은 CF₄가스의 진동 여기충돌과 진동 여기단면적의 공명효과 때문에 나타나는 것으로 생각된다. 한편 저온 플라즈마 중의 전자에

지분포는 전계효과에 의하여 Maxwell-Boltzmann 분포가 높은 에너지 측으로 이동하고 기체입자와의 비탄성충돌 threshold 전압 이상에서는 에너지 분포가 감소하는 것으로 나타났고 일반적으로 박막작성(薄膜作成)에 사용되는 저온 플라즈마중의 전자의 에너지분포함수는 Maxwell-Boltzmann 분포로 가정한다. 이것은 E/N(Td)영역에서는 전자여기나 전리 등의 비탄성충돌로 급격히 감소되어 나타나는 현상으로서 민감한 반응으로 여겨진다. 특히 그림8의 E/N : 5, 10(Td)에서는 BEq의 2항근사식과 SST법으로 해석하였다. 여기에서는 등방성분

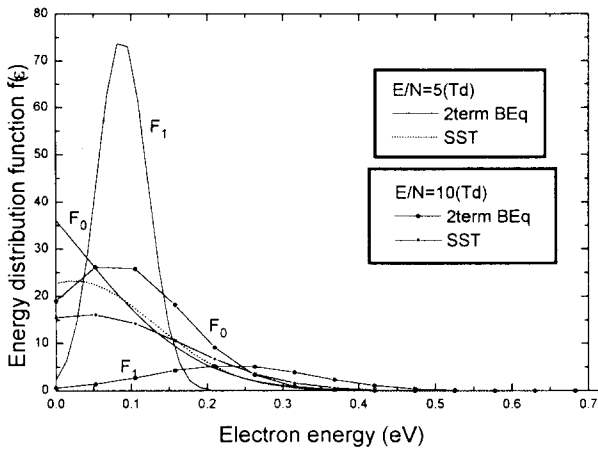


그림 8. CF₄ 가스중에서 전자에너지 분포함수
Fig. 8. The energy distribution function of electrons in CF₄ gas.

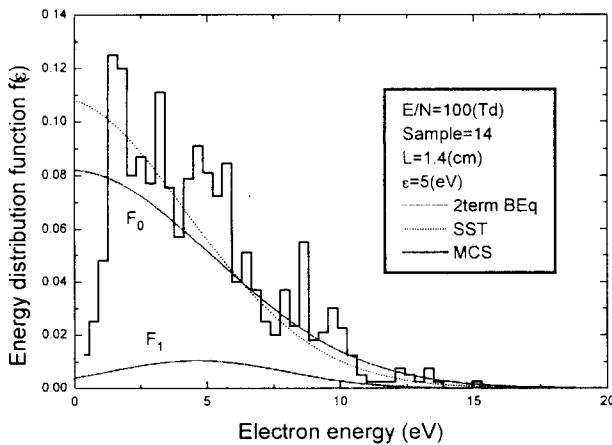


그림 9. CF₄ 가스중에서 전자에너지 분포함수
Fig. 9. The energy distribution function of electrons in CF₄ gas.

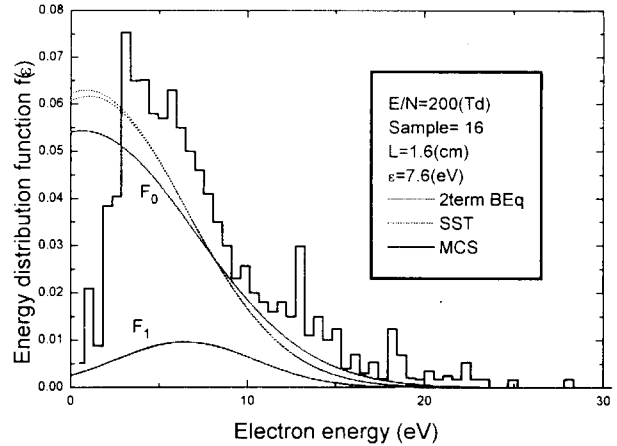


그림 10. CF₄ 가스중에서 전자에너지 분포함수
Fig. 10. The energy distribution function of electrons in CF₄ gas.

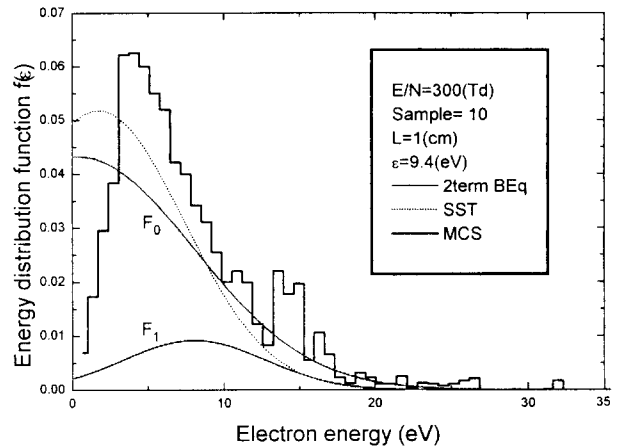


그림 11. CF₄ 가스중에서 전자에너지 분포함수
Fig. 11. The energy distribution function of electrons in CF₄ gas.

F₀에 대하여 비등방성분 F₁이 낮은 값으로 감소하고 MCS법으로는 나타나지 않았다. 또한 MCS법에 의하여 계산한 에너지분포함수와 볼츠만방정식의 수치해석에 의한 결과는 E/N : 100, 200, 300(Td)에서 큰 차이가 나타났다. 이것은 낮은 전계에서 전자의 수와 에너지가 비평형상태에 있기 때문으로 생각된다.

5. 결 론

e-CF₄가스중에서 E/N : 1~300(Td)범위에서

MCS와 BEq를 이용하여 전자에너지 분포함수와 종방향 확산계수 및 전자군 수송계수의 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. e-CF₄가스중에서 전하이동속도(W)의 전체적인 변화는 상대전계의 세기 E/N : 1~10(Td)영역에서는 실측치와 일치하였으나 E/N : 40~100(Td)영역에서는 감소되는 부구배[負勾配](NDC : Negative Differential Conductivity)로 인한 전자부성특성이 나타남을 알수있었다. 그리고 E/N : 100~300(Td)영역에서는 전하이동속도가 증가함에 따라 전기전도특성이 향상된다는 결론을 얻을 수 있었다.
2. 종방향확산계수(ND_L)는 E/N(Td)의 증가에 따른 의존성이 크게 작용하고 있음을 알수있었고 Q_m에 Ramsauer minimum을 가지고 있는 가스들의 독특한 특징을 나타내었다.
3. 높은 E/N영역에서는 하전입자가 낮고 전계강도가 높으므로 전리충돌의 발생이 어려우며 이 때문에 음극에서 방출된 전자의 전리증배만으로는 정상적인 방전상태가 유지되기 어려움을 알수있었다.
4. 전충돌단면적을 사용하여 전자에너지분포함수를 계산하였고 그 값으로부터 전자군파라미터를 계산하였다. 전자에너지분포함수의 값은 낮은 E/N영역 즉 저에너지 영역에서는 진동여기 충돌단면적(Q_{v1}, Q_{v2})의 확률이 운동량 변환단면적(Q_m)의 확률보다 크게 작용하므로 그 영향이 크게 나타났다. 또한 전자에너지분포의 차이는 E/N(Td)과 전자의 평균에너지의 값에 따라 큰영향이 나타남을 확인하였다.

6. 참고 문헌

1. 菅野卓雄 編著 “半導體プラズマプロセス技術”, 産業圖書, pp.38-50, 1993.
2. L. G. Christophorou, S. R. Hunter, J. G. Carter and R. A. Mathis, “Gases for possible use in diffuse-discharge switches”, Appl. Phys. Lett. 4, pp.147-149, 1982.
3. H. Itoh, M. Inomata, T. Matsumura, K. Satoh, Y. Suzuki, Y. Nakao, H. Tagashira “Electron Swarm Characteristics in Gas Mixtures Containing CF₄”, T. IEE Japan, Vol. 116-A, No. 4, pp.328-333, 1996.
4. 電氣學會技術報告, “氣體放電 シミュレーション技法”, 第140號, 1974.
5. “モンテカルロ法 と シミュレーション”, 培風館, 1989.
6. 하성철, 전병훈, 백승권, “몬테 칼로법을 이용한 Ar기체의 전자수송계수에 관한 연구”, 전기전자재료학회지, Vol. 8, No. 6, pp.685-692, 1995.
7. Philip. E. Luft, “Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients,” JILA. information center report, No.19, 1975
8. 中村, 富澤, 電氣學會放電研究會資料 ED-88-58, pp.29-37, 1988.
9. M Hayashi, “Swarm Studies and Inelastic Electron-Molecule Collisions”, L. C. Pitchford, Springer-Verlag, 1986.
10. 松村, 伊達, 田頭, 電氣學會放電研究會資料 ED-92-97, pp.31-39, 1992.

서사소개



임상원

1969년 6월 7일생. 1996년 2월 인천대학교 공대 전기공학과 졸업. 1997년 현재 동국대학교 대학원 전기공학과 재학중 (석사).



하성철

1940년 12월 25일생. 1966년 인하대학교 공대 전기공학과 졸업. 1985년 명지대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1994-95년 일본 Keio대학교 방문교수. 현재 동국대학교 공대 전기공학과 교수. 당학회 편수부위원장.