

CF₄-Ar혼합기체의 전자수송계수에 관한 연구

論 文

56P-1-1

Study on the Electron Transport Coefficient in Mixtures of CF₄ and Ar

金 相 南[†]
(Sang-Nam Kim)

Abstract- Study on the electron transport coefficient in mixtures of CF₄ and Ar, have been analyzed over a range of the reduced electric field strength between 0.1 and 350[Td] by the two-term approximation of the Boltzmann equation (BEq.) method and the Monte Carlo simulation (MCS).

The calculations of electron swarm parameters require the knowledge of several collision cross-sections of electron beam. Thus, published momentum transfer, ionization, vibration, attachment, electronic excitation, and dissociation cross-sections of electrons for CF₄ and Ar, were used. The differences of the transport coefficients of electrons in CF₄ mixtures of Ar, have been explained by the deduced energy distribution functions for electrons and the complete collision cross-sections for electrons.

The results of the Boltzmann equation and the Monte Carlo simulation have been compared with the data presented by several workers. The deduced transport coefficients for electrons agree reasonably well with the experimental and simulation data obtained by Nakamura and Hayashi. The energy distribution function of electrons in CF₄-Ar mixtures shows the Maxwellian distribution for energy. That is, $f(\epsilon)$ has the symmetrical shape whose axis of symmetry is a most probably energy.

The proposed theoretical simulation techniques in this work will be useful to predict the fundamental process of charged particles and the breakdown properties of gas mixtures.

A two-term approximation of the Boltzmann equation analysis and Monte Carlo simulation have been used to study electron transport coefficients.

Key Words : MCS(Monte Carlo Simulation), BEq(Boltzmann equation), CF₄ (Tetrafluoro Methane)

1. 서 론

약전리 기체 플라즈마의 연구는 전자 이온의 하전입자와 중성의 원자 분자 등으로 구성되는 이들 각 입자간의 상호작용으로 나타나는 매우 복잡한 현상이다. 이들 하전입자의 성질을 이해하기 위해서는 입자간의 이동 혹은 확산, 분자와의 충돌과정, 충돌단면적, 전리현상 또는 입자의 밀도, 속도, 에너지분포함수 등 전자 집합체로서의 물리적 현상을 명확히 규명해야 한다.

이와 같은 연구는 1872년 Boltzmann이 최초로 제시한 볼츠만 방정식에 의한 전자-분자간의 충돌단면적에 관한 이론 및 측정의 연구에 기초로 하였다. 그 후 1910년 열평형 상태에서 전자의 분포함수를 기술하는 Maxwell분포함수 및

전자-분자간의 탄성충돌론이 제안되었다.

또한 1930년에 Druyvesteyn은 전자-분자간에 탄성충돌만 고려한 분포함수를 속도, 위치, 시간을 포함하는 미분방정식의 형태로 나타내었다. 그 후 1946년 Holstein은 Lorentz 근사법과 Boltzmann방정식으로부터 전자에너지 분포함수를 만족시키는 미분 방정식을 유도하였고 탄성충돌 단면적이 비탄성충돌 단면적에 비하여 충분히 큰 값을 가진다는 이론을 확립하였다.[3]

따라서 본 논문은 CF₄ (Tetrafluoro Methane), 순수기체와 CF₄-Ar 혼합기체에서 전자의 이동속도, 종·횡축확산계수, 전리계수, 부착계수, 특성에너지, 평균에너지 및 전자에너지분포함수 등 전자의 수송계수의 특성을 볼츠만 방정식의 Backward prolongation법과 Monte Carlo Simulation 법에 의해 E/N=0.1~300 Td (E:전계, N:기체분자수밀도, 1 Td=1×10⁻¹⁷V·cm, 0°C, 1 Torr) P=0.1, 0.5, 1.0 Torr, 온도: 300K 범위에서 계산함으로써 이들 기체들이 가지고 있는 기초적인 물성을 해석하여 그 응용성을 검토하는 것을 목적으로 한다.

[†] 교신저자, 正會員 : 市立 仁川專門大學 電氣科 教授 · 工博

E-mail : sn7332@icc.ac.kr

接受日字 : 2006年 11月 1日

最終完了 : 2007年 2月 16日

CF₄(Carbon Tetrafluoride)가스는 할로젠 원소를 함유하며 전극등 고체표면에 흡착하기 쉬운 성질과 전자부착성 때문에 대체로 높은 절연내력을 가지고 있으며 방전공간에서 전계로 인하여 해리된 하전입자가 활성화한 분자로 존재한다($e^- + CF_4 \rightarrow CF_3 + F^* + e^-$, $CF_3 + F^-$, $CF_3^+ + F + 2e^-$).[4] 또한 비탄성 충돌 때문에 전자에너지를 저하시켜 절연내력이 향상되고 냉각효과도 크다.[5] 이와 같은 전자부착특성으로 가스방전 스위치에 이용되고 있는 중요한 기체이며 최근에는 반도체 디바이스 제조프로세스의 플라즈마 에칭(Plasma etching)에 많이 이용되고 있다.[6] 그리고 CF₄가스의 운동량변환단면적은 전자에너지가 0.1~0.8[eV] 부근에 Ramsauer minimum을 가지고 있기 때문에 큰 진동여기 충돌효과로 높은 E/N 영역에서 전하이동속도가 상승하고 이동도의 부구배(NDC:Negative Differential Conductivity) 특성을 나타내고 있다.[7]

또한 CF₄가스에 대한 전자군 특성 연구에서는 전자수송계수 즉 전하이동속도, 확산계수, 전리, 부착, 실효전리계수, 전자특성에너지, 평균에너지 및 전자에너지 분포함수에 관한 정확한 데이터가 요구되며 이와 같은 전자수송특성을 정량적으로 해석하기 위해서는 정확한 운동량 변환단면적, 여기단면적, 전리 및 부착단면적 등이 필요하고 이들의 값을 이용하여 전자군파라미터의 특성을 볼츠만 방정식(Beq) 과 몬테칼로 시뮬레이션(MCS)에 의해서 구하여지고 있다.[8]

본 연구에서는 CF₄가스의 전기전도특성을 나타내는 전하이동속도(W), 전자의 종방향 확산계수(ND_L), 전자의 특성에너지(D_L/μ), 전리(α/N), 부착(n/N), 실효전리계수(α-n/N), 평균에너지(ε) 및 전자에너지 분포함수(f(e)) 등의 전자군 수송파라미터를 E/N[Td] : 1~300[Td] (E : 전계, N : 기체분자수밀도, 1Td=1×10⁻¹⁷V·cm², N : 3.5353×10¹⁶cm⁻³ 0°C 1Torr에 해당)의 범위에서 비등방성 산란을 고려한 몬테칼로 시뮬레이션과 볼츠만 방정식의 Backward prolongation법에 의해서 계산, 해석하고 그 결과를 Y. Nakamura, M. Hayashi의 실험값 및 계산값과 비교 검토하여 이용한 충돌단면적의 타당성을 입증한다. 또한 실효전리계수α-n/N < 0의 영역으로부터 임계절연 파괴전계(E/N)_{lim}를 산출한다. 그리고 전하이동속도의 변화에 따른 부구배와 전기전도특성의 영향을 고찰한다. 본 연구에 의해 산출된 전자군 파라미터는 시뮬레이션에 있어서 약전리 플라즈마의 많은 정보 뿐만 아니라 특히 전자와 원자, 분자들사이의 상호작용에 의한 저에너지 영역의 전자산란은 중요한 데이터로서 활용이 기대되어진다.

2. 해석 방법

2.1 MCS법

MCS은 난수(Random Number)를 이용하여 충돌의 종류, 산란후의 방향 및 비행시간 등을 결정하면서 전자의 운동을 반복 추적한다. 또한 전자군의 성질을 조사하기 위한 몬테칼로법은 전자계내의 전자운동상태와 분자의 충돌산란확률을 고려하여 전자, 이온의 상태량을 추적하는 것을 기본으로 하여 입자를 확률현상의 난수로 모의하는 방법을 말한다. 사용하는 난수는 컴퓨터에서 발생하는 [0~1]사이의 의사난수(Pseudo random number)이다.[9]

MCS은 확률론적인 기법을 이용하기 때문에 얻어진 결과로부터 통계적인 분산이 생기는 단점이 있다. 이 때문에 신

뢰되는 파라미터를 구하기 위해서는 충분한 샘플수를 확보할 필요가 있다.

전자군에 대한 관측방법으로는 TOF, PT, SST 등이 있다. 몬테칼로 시뮬레이션에 있어서도 data 샘플링을 이들 관측법에 의해서 행한다. 3종의 관측법 중에 PT, SST에서는 계산을 행한 전자수가 그대로 샘플수로 생성되어 얻어지지만 TOF에서는 위치와 시간을 같이 지정하기 때문에 샘플수는 작게 된다. 더욱이 에너지 분포를 구하는 경우 샘플수는 점점 작게 되고 통계적 변동을 많이 포함한 결과가 되기 쉽다. 그것을 방지하기 위해 전자수를 많게 계산하는데 그것에 비례하여 계산기 시간도 증가한다.

몬테칼로법은 2차 대전기간 동안에 원자탄 개발을 위한 중성자 수송에 관련된 문제를 해결하기 위한 목적으로 많은 과학자들에 의해 연구, 발전되어왔다. 다양한 응용분야에서의 몬테칼로법 중에서 기체중의 전자의 거동에 관한 몬테칼로 시뮬레이션(MCS)으로는 H. Itoh, M. Musha 및 R. W. L. Thomas, W. R. L. Thomas 에 의해서 최초의 연구가 시작되었다[10].

2.2 BEq법

기체중의 방전현상을 원자론적인 입장에서 보면, 상호충돌을 되풀이 하는 하전입자 즉 전자, 원자, 분자, 이온에서 성립되며, 이들 하전입자는 전자군의 속도와 위치 및 시간에 따라 분류할 수 있는데, 하전입자가 열평형상태에 있는 경우를 제외하고는 전자의 운동 중 충돌에 의한 임의의 속도와 임의의 위치에 있는 전자의 수가 시간에 따라 변화한다.

하전입자 각각의 속도는 각각 다른 시간 t 와 더불어 변화하므로 일반적으로는 위치공간과 속도공간을 일치시킨 위상공간과 분포함수 개념을 도입하여 위치벡터 $\vec{r} = (x, y, z)$, 속도벡터 $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$, 시간을 t 로 놓았을 때, 전자의 위치 $\vec{r} - (\vec{r} + d\vec{r})$, 속도 $\vec{v} - (\vec{v} + d\vec{v})$ 의 범위에 있는 미소공간에 존재하는 입자수를 dn이라 하면

$$dn = f(\vec{r}, \vec{v}, t) d\vec{r} \cdot d\vec{v} \dots \dots \dots (1)$$

로 나타낼 수 있다.

여기서 f(\vec{r}, \vec{v}, t)는 속도분포함수이다.

볼츠만 방정식을 간단히 정리하면 다음과 같이 정리할 수 있다

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla_{\vec{r}} f + \vec{a} \cdot \nabla_{\vec{v}} f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right) \dots \dots \dots (2)$$

위 식에서 보면 전자군의 임의의 위치와 속도 및 시간을 갖는 전자수 밀도는 위치 변화에 따른 밀도와 전계의 속도 변화에 의한 밀도 그리고 충돌로 나타나는 속도 변화에 따른 밀도의 변화로 나타낼 수 있다는 것이다.

볼츠만 방정식은 열평형 상태가 아닌 경우 전자가 운동 중 충돌에 의한 임의의 속도와 임의의 위치에 따라 어떻게 변화하는가를 결정하는 것이다. 볼츠만에서는 몬테칼로 시뮬레이션과는 달리 개개의 전자를 추적하지 않고 처음부터 다수의 입자를 포함하는 전자류를 취급하기 위하여 충돌의 확률적 성질을 기초로 하여 전자군의 연속적인 관찰이 가능하다. 따라서 전자군의 운동 과정을 명확히 규명할 수 있으며 여러 가지 파라미터를 정량적으로 해석하는 경우 비교적 짧은 시간으로 전산 처리하여 구하는 것이 가능하다[11].

본 논문에서는 볼츠만 방정식에 의한 전리, 부착 및 실효전리계수의 수치해석은 Philip E. Luft의 Backward prolongation계산법을 이용하였다. 또한 전자가 음극에서부터 양극에 도달할 때까지 SPARC WORKSTATION(SS-20)으로 반복 추적하여 계산하였다.

3. 전자충돌 단면적

3.1 CF₄ 기체에서 전자의 충돌단면적

본 연구에 이용한 CF₄의 전자충돌단면적은 운동량변환단면적(Q_m), 진동여기단면적(Q_{v1} , Q_{v2}), 부착 단면적(Q_a), 여기 단면적(Q_{ex}), 해리단면적(Q_d) 및 전리단면적(Q_i)으로 구성되어 있다.

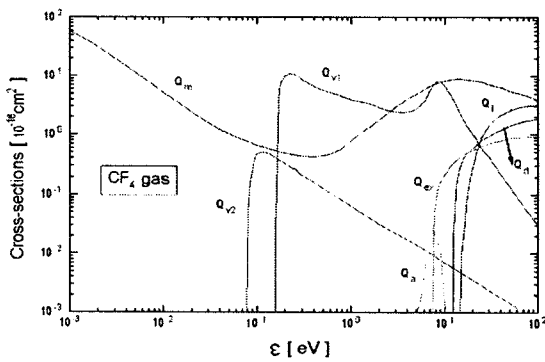


그림 3.1 CF₄ 기체에서 전자의 충돌단면적
Fig. 3.1 Collision cross sections for electrons in CF₄

이 CF₄의 전자충돌단면적은 운동량 변환단면적(Q_m)의 0.1~0.8 eV범위에서 Ramsauer Townsend Minimum (RTM)을 가지며 이 지점에 큰 진동 여기단면적(Q_{v1} , Q_{v2})이 존재하기 때문에 단면적 결정에 어려움이 있다. 또한 전자여기(Q_{ex})의 Threshold에너지 부근에 비교적 큰 부착단면적을 가지고 있으며, 이것이 전자부성특성을 나타내는 원인이 된다. 그리고 해리단면적(Q_d)과 전리단면적(Q_i)은 그림 3.1과 같은 Nakamura[12]의 실험치를 이용하였다.

3.2 Ar 기체에서 전자의 충돌단면적

그림 3.2의 전자충돌 단면적을 운동량 변환 단면적(Q_m), 여기 단면적(Q_{ex}), 전리 단면적(Q_i)으로 나타내었다.

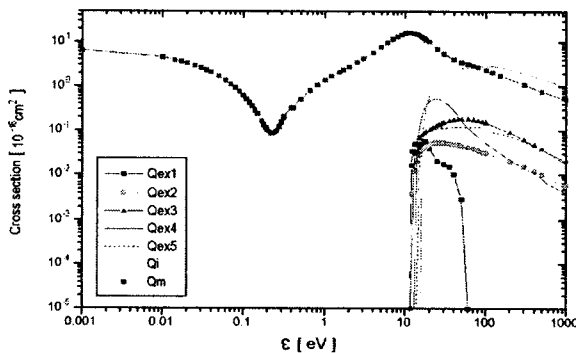


그림 3.2 Ar 기체에서 전자의 충돌단면적
Fig. 3.2 Collision cross sections for electrons in Ar

이 Ar의 전자 충돌 단면적은 저에너지 영역(0~0.23eV)에서 Bell과 Scott[12]의 계산값을 이용하였고 전자에너지 0.136 ~ 54.4 eV영역의 범위에서는 0.136 ~ 54.4 eV영역의 범위에서는 Arati Dasgupta의 실험값을, 60 ~ 150 eV범위에서는 Fon의 측정값을 이용하였다. 그리고 여기 단면적(Q_{ex})은 허용대 준위의 여기 단면적(3P_2 , 3P_1 , 3P_0 , 1P_1)과 금지대 준위의 여기단면적(13.0-13.9 eV)으로 분류하여 Nakamura와 Kurachi, Chutjian등의 측정값을 이용하고 전리 단면적은 Donald Rapp[14]의 측정된 결과를 이용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 CF₄-Ar 혼합기체에서 전자의 이동속도

그림 4.1의 전자이동속도는 E/N=10 Td까지 CF₄(0.1%) -Ar (99.9%)와 CF₄(5%)-Ar(95%)를 Hayashi와 Nakamura의 값과 비교한 것이다.

이 그림에서 Hayashi와 Nakamura[15]가 측정된 순수 CF₄ 기체는 운동량변환단면적 0.1~0.8 eV부근에서 넓은 RTM과 큰 진동여기단면적이 존재한다. 혼합기체의 NDC에서 적은 혼합비율의 기체(CF₄또는 CH₄)의 Q_m 의 영향은 거의 없다. 따라서 Ar의 RTM을 갖는 Q_m 과 CF₄ 또는 CH₄의 낮은 에너지 영역의 Q_v 등에 의해 혼합기체의 전자이동속도와 ND_L에서 NDC 현상이 보여진다.

CF₄-Ar혼합기체에서는 낮은 E/N에서 CF₄의 운동량 변환 단면적이 Ar에 비해 크기 때문에 그 혼합비가 5%인 혼합기체는 0.1% 혼합된 결과보다 전자이동속도의 값이 더 높지만 E/N값이 점점 증가함에 따라 양 기체의 운동량 변환단면적 크기가 커다란 차이를 보이지 않게 되어 전자이동속도의 값은 혼합비에 상관없이 일치되어가는 것을 볼 수 있다.

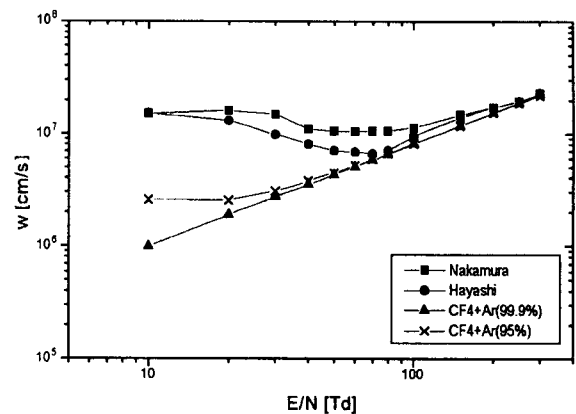


그림 4.1 CF₄-Ar 기체에서 전자의 이동속도
Fig. 4.1 Drift velocity of electrons in CF₄-Ar

4.2 CF₄-Ar 혼합기체에서 전자의 에너지 분포함수

그림 4.2과 4.3은 E/N=50 [Td]에서 CF₄기체가 0.1[%]와 5[%]가 함유된 혼합기체에서 전자의 에너지 분포함수를 나타낸 것으로 그림 4.2에서 F(ε)의 초기값에서는 전자에너지가 증가하고 높은 전자에너지 측에서는 감소하는 경향이 나타났다. 이와 같은 현상은 CF₄ 기체의 진동 여기충돌과 진동 여기단면적의 공명효과 때문에 나타나는 것으로 생각된다.

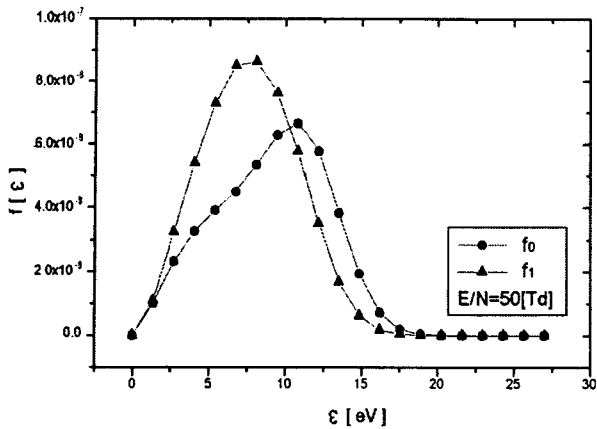


그림 4.2 CF₄-Ar 혼합기체에서 에너지 분포함수(1)
Fig. 4.2 Energy distribution function in CF₄-Ar(1)

그림 4.3에서도 전자에너지 분포는 전계 효과에 의하여 Maxwell-Boltzmann 분포가 높은 에너지 영역으로 이동하고 기체입자와의 비탄성충돌 Threshold 전압 이상에서는 에너지 분포가 감소하는 것으로 나타났고 일반적으로 박막작성(薄膜作成)에 사용되는 저온플라즈마중의 전자의 에너지 분포함수는 Maxwell-Boltzmann 분포로 가정한다. 이것은 E/N=50 [Td]영역에서는 전자여기나 전리 등의 비탄성충돌로 급격히 감소되어 나타나는 현상으로서 민감한 반응으로 여겨진다.

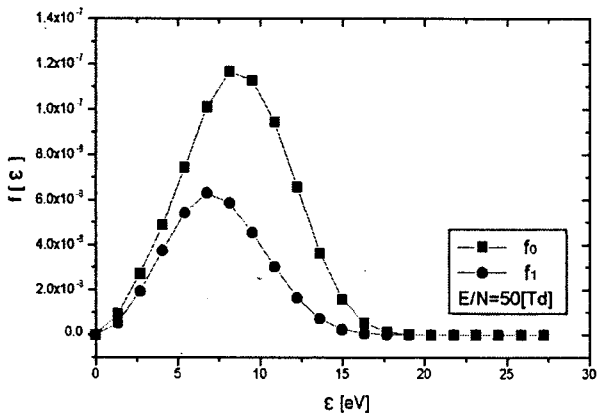


그림 4.3 CF₄-Ar 혼합기체에서 에너지 분포함수(2)
Fig. 4.3 Energy distribution function in CF₄-Ar(2)

4.3 CF₄-Ar 혼합기체의 전리계수

그림 4.4는 Hayashi와 Nakamura[16]의 실험값을 본 연구에서 계산된 값과 비교하여 나타낸 것이다. E/N의 증감에 따라 전자의 충돌 전리계수에는 변화가 발생하였으며, 전리전압이 높은 임의의 값 이상에서는 전리에너지의 상승으로 기체 방전현상에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 한편 전리에 의하여 발생한 전자는 중성분자에 부착하여 부이온을 형성시켜 전리능력을 감소시킨다.

CF₄-Ar 혼합기체에서는 Ar의 혼합비율이 상대적으로 매우 크기 때문에 CF₄ 기체의 부착능력은 미약하여 나타내지 못하였다.

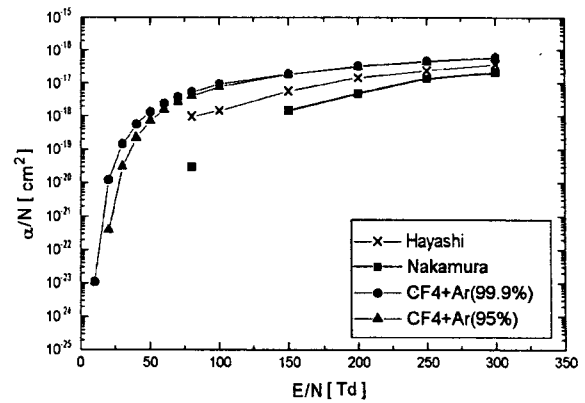


그림 4.4 CF₄-Ar 기체에서 전리계수
Fig. 4.4 Ionization coefficients in CF₄-Ar

4.4 CF₄-Ar 혼합기체에서 전자의 평균에너지

그림 4.5는 Hayashi와 Nakamura의 초기 비평형상태로 나타나는 실측치와 CF₄-Ar(99.9%)와 CF₄-Ar(95%)의 두 혼합기체의 평균에너지를 비교하여 나타낸 것으로 낮은 E/N 영역에서 Hayashi와 Nakamura의 실측치와는 달리 거의 일정한 평형상태의 평균에너지 값의 결과를 나타내고 있다.

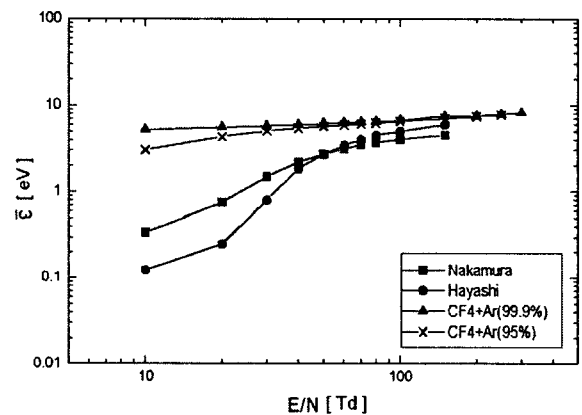


그림 4.5 CF₄-Ar 혼합기체에서 전자의 평균에너지
Fig. 4.5 Mean energy of electrons in CF₄-Ar

5. 결 론

본 논문에서는 2항 근사의 볼츠만 방정식과 몬테칼로법에 의하여 순수 Ar에 미량의 CF₄를 혼합한 기체 중에서 전자군 수송계수와 전자에너지 분포함수를 시뮬레이션에 의해 정량적으로 계산하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CF₄기체 중에서 전자의 이동속도(W)의 전체적인 변화는 상대전계의 세기 E/N=1~10 Td와 100~300 Td 영역에서는 Nakamura 와 Hayashi의 실험값과 일치하였으나 E/N=20~100 Td 영역에서는 진동여기단면적의 강한 충돌에 의해서 감소되는 부구배[負勾配](NDC : Negative Differential

Conductivity)현상으로 전자에 대한 부성특성이 나타났다. 그리고 E/N=100~300 [Td] 영역에서는 전자의 이동속도가 증가함에 따라 전기전도특성이 급격히 향상되는 특성을 얻었다. 그리고, CF₄-Ar 혼합기체 중에서 전자의 이동속도는 낮은 범위 E/N=10~80[Td]범위에서 혼합비에 따라 차이가 있었으나, 높은 E/N=100~300[Td]에서는 혼합비에 따른 특성 차이 없이 증가하는 현상이 나타났다.

(2) CF₄ 기체에서 전자의 종방향 확산계수(ND_L)를 MCS와 BEq로 계산하였으며, BEq의 결과가 실험값에 근사하는 반면, MCS에 의해 계산된 값이 약 E/N=35 Td에서 실험값보다도 크며, 1.4×10²³ cm⁻¹s⁻¹정도 차이가 나는 것은 진동 여기 단면적(Q₀₁)의 공명 peak가 작기 때문으로 판단하였다. 또한 E/N에 따른 ND_L의 변화가 E/N중간에서 급하게 가라앉는 특징은 Q_m에 RTM을 가지고 있는 기체들에서 자주 나타나는 독특한 특징이다. 한편 CF₄-Ar 혼합기체는 혼합비에 따라 일정한 변화로 균일한 밀도분포를 나타내었고, 전리계수는 E/N=50 Td에서 전리에 의해 발생한 전자가 중성분자에 부착하여 전리 능력이 저하됨을 알았다.

(3) CF₄-Ar 혼합기체의 에너지 분포함수는 초기 에너지에서는 증가하고 그 이상의 전자에너지에서 감소하는 경향이 나타났다. 따라서, 본 연구에 이용한 운동량변환 단면적, 여기 단면적, 진동여기 단면적 및 전리·부착 단면적 등의 타당성이 밝혀졌다.

이처럼 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션으로 MCS법과 볼츠만 법에 의한 결과값은 실험값과 거의 일치하는 것으로 최근에 공학적으로 유효한 수단이 되고 있으며 우수한 프로그램이라는 것이 입증됨으로써 실험에 드는 비용 및 시간을 크게 절약할 수 있고 CF₄ 플라즈마를 이용한 기관가공 기술, 반도체의 박막 공정, 플라즈마 에칭기술, Plasma CVD의 활용 및 기초적인 물성data를 얻는데 크게 기여할 것으로 판단되어진다.

참 고 문 헌

[1] 高柳和夫, “電子, 原子, 分子の衝突”, 培風館, pp. 51-69, 1978.
 [2] J. H. S. W. Massey & E. H. S. Burhop, “Electronic and Ionic Impact Phenomena 1”, Clarendon Press, Oxford, pp. 175, 1969.
 [3] Tonks L and Langmuir J, Phys. Rev. 33, pp.195-210, 1929.
 [4] 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.
 [5] 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.
 [6] 菅野卓雄 編著, “半導体プラズマプロセス技術”, 産業圖書, pp.38-50, 1993.
 [7] 山本, 生田, “モンテカルロシミュレーションによるCF₄カスの電子衝突斷面積”, 電氣學會放電研究會資料, ED-92-101, pp.71-80, 1992.

[8] 電氣學會技術報告, “氣體放電 シミュレーション技法”, 第140号, 1974.
 [9] 小沼光晴著 “プラズマと成膜の基礎”, 日刊工業新聞社, pp.13-20, 1993
 [10] 大森義行, 下妻光夫, 田頭博昭, “SiH₄ ガスの電子衝突斷面積およびスウォームパラメータ”, 電氣學會研究會資料, ED-86-114, HV-86-34, 1988.
 [11] Philip. E. Luft, “Description of a Backward prolongation program for computing transport coefficients”, JILA. information center report, No.19, 1975.
 [12] Y. Nakamura and M. Kurachi “Electron Transport Parameters in Argon and its momentum transfer cross section” J.Phys.21, pp.718-723, 1988
 [13] K. L. Bell, N. S. Scott and M. A. Lennon, “The Scattering of low-energy electrons by Argon atoms” . J. Phys. B: At. Mol. Phys. 17, pp. 4757-4765, 1984
 [14] Donald Rapp and P. Englander-Golden “total cross sections for Ionization and Attachment in Gases by Electron Impact I. Positive Ionization”, J. phys. Vol.43, No.5, PP. 1464-1479(1965)
 [15] M. Hayashi, “Swarm Studies and Inelastic Electron-Molecule Collisions”, L. C. Pitchford, Springer-Verlag, 1986.
 [16] 金相南, “시뮬레이션에 의한 CF₄, CH₄, Ar混合氣體에서 전자에너지분포함수” 대한전기학회논문집, 52P-1-2, pp. 9~13, 2003

저 자 소 개



김 상 남 (金 相 南)

1950년 3월 21일생. 1978년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1980년 숭실대학교 대학원 졸업(석사) 2001년 동국대학교 대학원 졸업(공학박) 1978년~현재 시립 인천전문대학 전기과 교수

Tel : 032-760-8704

Fax : 032-760-8467

E-mail : sn7332@hanmail.net, sn7332@icc.ac.kr