

Recent Technical Method and Research Trend of the MCS

하성철*, 이복희*, 백승권**

(Sung-Chul Ha, Bok-Hee Lee, Seung-Kwon Paek)

Key words(중요용어) : Electron swarm parameter(전자군파라미터), Electron energy distribution function(전자 에너지 분포함수), Monte Carlo Simulation(몬테칼로 시뮬레이션), Time of Flight Method(비행시간법)

1. 서 론

최근 국내외적으로 고도산업과 경제성장으로 전력 수요가 증가하는 실정에 있다. 따라서 전력전송의 고전압화, 초고전압기기 등의 출현을 위하여 기체의 임계절연과 파괴 강도의 해명과 전자수송계수(Electron swarm parameter)에 관한 연구가 요망되고 있는 실정이다. 특히 전자수송계수에 관한 연구는 전자, 이온, 분자등 각 하전입자의 상호작용의 결과로 발생되는 대단히 복잡한 현상이다. 이 현상을 정량적으로 해석하고 그의 물리량을 명확히 파악하는 것은 산업응용분야의 기초자료로 활용이 크기 때문이다. 전력에너지 분야에서 1970년대에 활발하게 연구한 과제는 가스절연기기의 개발이었다. 이 연구개발은 가스분자가 전자충돌로 전리증식 없이 여러 종류로 이루어지는 전자를 분자에 부착시켜 소멸시키는 것이었다. 기체방전 현상의 연구는 절연과 파괴전압에 직접 관계되는 E/N(Td) 부근에서 많이 이루어져 절연 가스의 특성 평가지수로서 임계절연과 파괴를 구하기 위하여 실험적, 이론적 계산이 이루어져 왔다. 1980년대 초기부터 기체방전 현상으로 나타나는 저온 플라즈마 및 반도체 플라즈마 분야에서 dry etching의 동작기체로 이용되고 있는 실정이다. 저온 플라즈마를 이용하여 고체재료를 깎고 그 깎은 찌꺼기나 앙금을 가스화 하여 시스템(계)밖으로 배출하는 dry etching 기술에서는 원료가스가 플라즈마로 해리되어 발생한 radical(활성화) 분자나 전리된 정이온이 주역이 된다.¹⁾ 이와 같이 저온 플라즈마를 이용한 반도체 미세가공의 발전은 우리나라 산업계에 큰 공헌을 할 것으로 전망된다. 또한 전자수송특성의 연구는 기체방전의 수치적 데이터, 경제성의 저림화, 절연내력의 개선, 물성적, 전기적 특성 및 응용계산의 program화, 분해생성물 및 swarm parameter의

데이터 구축, 대기오염 및 환경오염 물질의 제거와 분해에 관한 연구계획등 새로운 과학기술 자료가 보유했을 것으로 기대된다. 따라서 외국에서는 이 분야의 연구가 오늘에 이르기까지 활발히 진전되고 있으나 국내에서는 거의 미흡한 실정에 있다. 특히 기체방전 플라즈마를 이용하여 기능성 박막의 생성, 반도체 미세가공 에칭 등의 플라즈마 프로세싱에 관한 연구가 다각적으로 이루어지고 있다. 기체에 전계를 인가하여 전리화 시켜 이로 인하여 전자에너지 분포함수, 전자이동속도, 확산계수등의 전자수송계수 연구는 볼츠만 방정식의 해석방법과 몬테칼로 시뮬레이션기법으로 이용되고 있다.²⁾ 볼츠만방정식 해석은 그 방법이 추상적이기 때문에 해석결과의 정당성을 평가하는데에는 몬테칼로 시뮬레이션이 이용되고 있다. MCS법은 가스의 탄성 및 비탄성 충돌을 고려한 비교적 높은 E/N(Td) 영역의 범위에서 낮은 전리로 전자에너지 분포함수와 전자 swarm parameter를 해석하는 가장 우수한 방법으로 현재 많은 연구자들에 의해 이용되고 있다.³⁾ 이것은 방전공간 내에서 전자의 운동을 하나하나 추적하여 각종 parameter의 위치적 변동에 의해서 전자의 평균에너지와 전자의 위치 및 시간의 함수 f(ε, r, t)로서 전자수송량의 평균 즉 전자수송계수를 구하는 방법이다.^{2,4)}

이와 같은 이론은 Itoh, Musha(1960) 및 R.L Thomas, R.W.G Thomas(1969)에 의하여 최초의 연구가 시작되었다.^{5,6)} 즉 전자사태에서 나타나는 전체의 전자를 추적하고 0~1 사이에 일정한 분포를 갖는 난수를 이용하여 충돌의 종류, 산란후의 방향, 비행시간 등의 동향을 조사하여 이들 전자의 물리량을 가상적으로 샘플링(Sampling)하고 그들 하전입자의 운동을 전자계산기로 추적하여 전자 swarm parameter를 확률적으로 결정하는 것이다. 본 해설

에서는 MCS 기법의 기본이론, 전자 swarm parameter의 simulation 방법에 대하여 해설한다.

2. 전자군 Parameter 의 MCS

기체중을 운동하고 있는 하전입자(전자 및 이온) 군 파라미터의 해석 및 예측을 컴퓨터를 이용하여 수행하는 Monte Carlo Simulation(MCS) 기법을 설명하고자한다. 기체 중에서 미립자운동(전자, 원자 및 분자)의 본질적인 성질은 개개의 충돌이 일어나는 위치나 시간 그리고 충돌전후의 운동방향등을 확률적으로 나타내어 기체방전이론의 기초 물리량인 전자군 파라미터를 관측조건 등에 의해서 정의되고 해석하는 것이다. 전자운동의 이와 같은 확률적인 측면은 불규칙적인 현상을 모델화하고 어떤 목적에 필요한 샘플을 추출할 때에 난수가 사용된다. 여기서 난수는 어떤 특정한 확률분포를 갖는 수열이며 전자계산기 내부에서 발생한 의사난수(pseudo random number)를 반복 이용하여 실험없이 실험결과를 구하는 실험적 수학의 한 분야이다. 또한 난수를 이용하여 충돌현상을 확률적으로 취급하고 사용한 난수를 계산기에 발생시켜 [0,1] 사이에 대응할 때 독립한 난수열을 다수회 수행시켜 확률적으로 모의하는 과정이 MCS 기법이다.^{2,7)} 다음으로 전자군 파라미터의 특성을 조사하기 위해서는 전자궤도운동의 계산, 충돌까지의 거리 및 시간의 결정, 충돌종류의 판정, 충돌후의 전자의 산란방향결정, 충돌종류와 산란방향에 의한 충돌후의 전자에너지결정, 전리가 일어날 때 생성전자의 에너지배분 및 운동방향의 결정 등에 의해서 기술된다. 난수를 변수 θ 와 $d\theta$ 의 미소 범위에서 발생하는 확률을 $f(\theta)d\theta$ 로 나타내면 다음과 같이 식 (1)으로 나타낸다.^{2,3,4,7)}

$$\int_0^{\theta_{max}} f(\theta)d\theta = \gamma \text{ -----(1)}$$

여기서 γ 은 0~1 사이에 균일하게 분포되어있는 난수이다.

그리고 난수를 만족시키는 조건과 발생법은 다수의 난수가 발생되어야 하고 발생된 난수의 주기는 충분히 길고 일정한 것으로 초기난수가 주어지면 발생한 난수의 수열은 임의적으로 정하고 통계적 성질을 만족해야한다. 그의 산술난수의 값은 승적합동법으로 의사난수를 구하여 사용하고 승적합동법은 다음과 같은 난수발생법으로 나타낸다.

$$Y_{k+1} = a Y_k + c \pmod{m} \text{ -----(2)}$$

식(1)에 의해서 순차적으로 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_k$ 를 발생시키는 방법이다. 여기서 a, c, m은 정의 정수이며 본 논문의 프로그램에서는 다음 값을 이용한다.

$$a : 1229, c : 351750, m : 1664501$$

이 경우에 $a\gamma_k + c$ 를 m으로 나누어서 남은 나머지를 의미한다. 또한 γ_k 에 대해서는

$$S_k = \gamma_k / m \text{ -----(3)}$$

으로 계산하면 S_k 는 구간 [0, 1] 사이에서 일정한 분포의 난수가 된다. 이 방법으로 발생한 난수 γ_k 는 $0 \leq \gamma_k \leq m-1$ 을 찾아서 m개를 생성하고 계속 반복된다.

2-1. 궤도계산 및 충돌의 판정

전계가 존재하는 공간에서는 전자는 가속을 받아 포물선 궤도운동을 한다. 기체분자는 충돌을 하고 전자는 운동에너지의 일부분을 잃어버리고 새로운 궤도운동을 시작한다. 잃어버린 에너지는 충돌의 종류, 산란의 편향각 등에 의하여 정한다. 전자의 운동을 추적하여 충돌을 판정하는 방법을 2가지로 분류한다. 이중 한가지의 방법은 전자의 운동을 미소비행거리 Δl 로 나누어서 궤도를 계산하고 Δl 의 비행할 때마다 충돌의 유무를 판정하는 방법으로 Itoh, Musha에 의해서 이용되었다. 다른 한가지 방법은 궤도 계산 및 충돌의 판정을 시간축상에 행하는 Δt 분할법, FFT법 및 Null Collision법 등이 있다.²⁾ 본 해설에서는 전자의 포물선 궤도운동을 미소비행거리 Δl 마다의 직선운동을 근사화하여 충돌의 유무판정을 기술한다. 지금 -Z 방향으로 전계 E_0 가 존재하고 전자가 시간 t에서 위치 (x, y, z)와 속도 (v, θ, ϕ)를 갖는다고 한다. 시간 t+ Δt 에서 위치 ($z+\Delta z$) 및 속도 (v', θ', ϕ')는 다음과 같이 계산한다. 여기서 전자의 질량을 m, 전하를 e로 한다.

$$\frac{1}{2} m v'^2 = \frac{1}{2} m v^2 + e E_0 \Delta Z \text{ -----(4)}$$

$$m v' \cos \theta' = m v \cos \theta + e E \Delta t \text{ -----(5)}$$

$$m v' \sin \theta' = m v \sin \theta \text{ -----(6)}$$

$$\Delta Z = \Delta l \cos \theta \text{ -----(7)}$$

이들 식으로부터

$$v' = \sqrt{\frac{2e}{m} E_0 \Delta l \cos \theta + v^2} \quad \text{-----}(8)$$

$$\cos \theta' = \pm \frac{1}{v'} \sqrt{\frac{2e}{m} E_0 \Delta l \cos \theta + v^2 \cos^2 \theta} \quad \text{----}(9)$$

$$\Delta t = \frac{m}{eE} \pm \sqrt{\frac{2e}{m} E_0 \Delta l \cos \theta + v^2 \cos^2 \theta - v \cos \theta} \quad \text{-----}(10)$$

로 나타난다. 미소비행거리 Δl 로서 평균자유행정 λ 의 1/10으로 정한다. Δl 법의 특징은 미소비행거리 Δl 마다 난수를 이용하여 충돌의 유무를 판정하고 있는 점이다. 미소비행거리 Δl [cm]의 비행으로부터 충돌이 일어나는 확률 $P_{\Delta l}$ 은 다음과 같이 나타낸다.

$$P_{\Delta l} = N Q_T(v) \Delta l$$

여기서 N : 기체분자수 밀도 (cm^{-3}), Q_T : 전 충돌단면적 (cm^2), $N Q_T(v)$: 속도 v (cm s^{-1})를 갖는 전자가 거리 1cm를 주행하는 사이에 충돌을 일으키는 확률이다. 예로써 $N Q_T(v) \Delta l = 0.1$ 이 되도록 Δl 를 선택할 때 난수는 다음과 같이 판정한다.

$$\xi \leq 0.1 \text{ 일 때 충돌이 일어나고} \quad \text{-----}(11)$$

$$\xi > 0.1 \text{ 일 때 충돌이 일어나지 않는다.} \quad \text{-----}(12)$$

충돌이 일어났다고 판정될 때는 좌표 ($x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$)를 새로운 출발점으로 하여 새로운 속도 (v', θ', φ')로 재차 $N Q_T(v') \Delta l = 0.1$ 만큼 비행하여 충돌의 유무를 조사하고 충돌이 일어나고 있다고 판정할 때까지 반복된다.

2-2. 충돌종류의 판정

충돌의 종류에는 탄성충돌, 비탄성충돌(여기, 전리, 부착 등)이 있고 각각 충돌이 일어나기 쉬운때 속도 (v) 및 에너지 $\epsilon = 1/2 m v^2$ 에 의해서 변화하고 충돌단면적 $Q_k(v)$ 및 $Q_k(\epsilon)$ 로 기술된다. 이들은 미분단면적 $\sigma_k(v, \omega)$ 를 전입체각에 대하여 적분하여 얻어진 적분단면적이다. 따라서 입사에너지 ϵ' 에 의해 탄성충돌, 여기충돌 및 전리충돌이 일어난다고 하면 전 충돌단면적은 다음과 같이 나타낸다.²⁾

$$Q_T(\epsilon') = Q_{el}(\epsilon') + Q_{ex}(\epsilon') + Q_i(\epsilon') \quad \text{-----}(13)$$

전 충돌단면적중 각각의 충돌단면적의 내분비와 일정한 난수 ξ 를 대응시키면 다음과 같이 판정한다.

$$\xi \leq Q_{el}(\epsilon') / Q_T(\epsilon') \quad \text{--- 탄성충돌} \quad \text{-----}(14)$$

$$Q_{el}(\epsilon') / Q_T(\epsilon') < \xi < \{ Q_{el}(\epsilon') + Q_{ex}(\epsilon') \} / Q_T(\epsilon') \quad \text{--- 여기충돌} \quad \text{-----}(15)$$

$$\xi > \{ Q_{el}(\epsilon') + Q_{ex}(\epsilon') \} / Q_T(\epsilon') \quad \text{--- 전리충돌} \quad \text{-----}(16)$$

2-3. 충돌후 산란방향의 결정

충돌한 후 전자의 산란 방향을 다음과 같이 구한다. 에너지 ϵ 을 갖는 전자가 k번째 충돌 때의 미분단면적을 $\sigma_k(\epsilon, \omega)$ 로 하면 그때의 적분단면적을 $q_k(\epsilon, \omega)$ 는 다음과 같이 나타낸다.^{2,3)}

$$q_k(\epsilon) = \int_0^\pi \sigma_k(\epsilon, \omega') 2\pi \sin \omega' d\omega' \quad \text{-----}(17)$$

여기서 편향각 ω 와 방위각 χ 은

$$\xi_1 = \int_0^\omega \sigma_k(\epsilon, \omega') 2\pi \sin \omega' d\omega' / q_k(\epsilon) \quad \text{-----}(18)$$

$$\xi_2 = \chi / 2\pi \quad \text{-----}(19)$$

식 (18)과 (19)로 구한다. ξ : 난수 전자의 입사방향 (θ', φ') 및 그에 대한 산란방향 (ω, χ) 과 전자의 새로운 운동방향 (θ, φ) 은 다음과 같이 나타낸다.

$$\cos \theta = \cos \theta' \cos \omega + \sin \theta' \sin \omega \cos \chi \quad \text{---}(20)$$

$$\cos \varphi = 1/\sin \theta \{ \cos \varphi' (\cos \omega \sin \theta' + \sin \omega \cos \theta' \cos \chi) - \sin \varphi' \sin \omega \sin \chi \} \quad \text{-----}(21)$$

$$\sin \varphi = 1/\sin \theta \{ \sin \varphi' (\cos \omega \sin \theta' + \sin \omega \cos \theta' \cos \chi) + \cos \varphi' \sin \omega \sin \chi \} \quad \text{-----}(22)$$

또한 미분단면적 $\sigma_k(\epsilon, \omega)$ 는 충돌전의 전자에너지 (ϵ)에 의하여 결정되지만 미분단면적의 입력 에너지 값이 다른 미분단면적 $\sigma(\epsilon_j, \omega)$ 와 $\sigma(\epsilon_{j+1}, \omega)$ 로 표현될 때 미분단면적 $\sigma_k(\epsilon, \omega)$ 는

$$\sigma_k(\epsilon, \omega) = \sigma(\epsilon_j, \omega) + \{ \sigma(\epsilon_{j+1}, \omega) - \sigma(\epsilon_j, \omega) \} \times (\epsilon - \epsilon_j) / (\epsilon_{j+1} - \epsilon) \quad \text{-----}(23)$$

식 (23)으로 나타낸다.

2-4. T.O.F (Time of Flight) 샘플링

TOF 에서는 위치와 시간을 함께 지정하기 때문에 샘플수는 적고 한편으로 에너지분포를 구할 때 샘플수는 차츰 적어져 통계적 변동을 다수 포함한 결과로 되기 쉽다. 전자수를 많이 택하면 전자계산기의 계산시간도 그에 비례하여 증가하므로 이것을 보완하기 위하여 순수한 관측 법에서의 차이를 지정하는 영역에서 어느 정도의 폭을 갖게 한다. TOF 샘플링법으로 방전공간의 전자이동속도, 확산계수, 평균에너지를 구하기 위해서는 시간 t_k, t_{k+1} 에서 전자의 샘플수를 M_k, M_{k+1} 로하고 위치영역을 $Z(t_k)$ 로할 때 시간 t_k 에서의 전자군 중심의 평균위치 $\langle Z(t_k) \rangle$ 는 다음과 같이 식 (24)으로 나타낸다.^{2,8)}

$$\langle Z(t_k) \rangle = \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^{M_k} Z_j(t_k) \quad \text{-----}(24)$$

전자군의 중심이동속도 W는 다음과 같다.

$$W = \frac{\langle Z(t_{k+1}) \rangle - \langle Z(t_k) \rangle}{(t_{k+1} - t_k)} \quad \text{-----}(25)$$

한편 전자의 확산계수는 시간 t_k 일 때 전자의 전계 방향의 중심위치를 $Z_m(t_k)$ 라면 종방향 확산계수 D_L 은 전자의 전계방향의 위치분산

$$\frac{1}{2!M_k} \sum_{j=1}^{M_k} \{Z_j - Z_m(t_k)\}^2 \quad \text{-----}(26)$$

식(26)의 시간에 대한 기울기로 구한다. 그리고 횡방향 확산계수 D_T 는 전계와 직각방향의 위치분산

$$\frac{1}{2} \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^{M_k} (r_j^2) \quad \text{-----}(27)$$

식(27)은 시간에 대한 기울기로 구한다. 여기서 r_j 는 Z_j 의 직각방향 성분이다. 평균에너지($\bar{\epsilon}$)는 i 번째의 에너지를 ϵ_i 라고 하면

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{M_k} \sum_{j=1}^{M_k} \epsilon_j \quad \text{-----}(28)$$

으로 나타낸다.

2-5. Simulation의 구성예

본 시뮬레이션은 전계중을 운동하는 전자-중성가스분자 사이의 상호작용만을 고려하고 하전입자상호간의 작용은 무시한다. 그리고 전자궤도 추적의 방법은 Itoh, Musha의 것을 적용하였다.⁴⁾ 따라서 평행 평판 전극간에 방출된 초기전자가 전계에 의하여 포물선운동을 하면서 중성분자와 충돌산란으로 2차전자가 전극사이에서 발생하고 비탄성충돌에 의한 전자에너지 손실이 이루어 질 때까지를 몬테칼로법으로 추적한다. 초기전자는 시간 $t=0$ 에서 음극의 한점에 존재하고 전계, 기체수밀도, 전자수 및 전자의 초기속도 등이 주어진다. 따라서 전자의 평균에너지로 추적되는 평균 전자충돌주파수와 추적시간과의 곱은 큰 값이 필요하므로 비탄성 충돌일 때는 수천회 충돌하는 것으로 설정하였다. 전자의 평균자유행정(λ)은 전자운동의 미소비행거리 $\Delta l = \lambda/10$ 으로 궤도를 계산한다. 또한 TOF 에서는 위치와 시간을 지정한 그 점의 전자 평균에너지와 전자궤도에서 전리가 일어난 경우의 샘플수(No. of sampling points : 20등분)와 난수(Random Number : 13)등을 양극(컬렉터)에 도달할 때까지 반복 추적하여 시뮬레이션한 결과를 표1에 나타내었다. 표1의 전자군 시뮬레이션의 결과는 FORTRAN77을 전자계산기 SPARC WORKSTATION을 이용하여 계산하였고 MCS flow chart의 개략적인 흐름도를 그림1에 나타내었다.

표 1. 전자군의 몬테칼로 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 = 200.000 (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-06	3022	0.1253E-02	0.1866E-05	0.6196E-06	0.6181E+01
2	0.1000E-07	3060	0.2081E-02	0.4127E-05	0.1231E-05	0.6315E+01
3	0.1500E-07	3103	0.2916E-02	0.6476E-05	0.2130E-05	0.6685E+01
4	0.2000E-07	3196	0.3785E-02	0.8840E-05	0.2896E-05	0.6543E+01
5	0.2500E-07	3270	0.4638E-02	0.1123E-04	0.3801E-05	0.6478E+01
6	0.3000E-07	3389	0.5527E-02	0.1423E-04	0.4412E-05	0.6352E+01
7	0.3500E-07	3471	0.6376E-02	0.1855E-04	0.5155E-05	0.6767E+01
8	0.4000E-07	3545	0.7211E-02	0.1927E-04	0.6108E-05	0.6540E+01
9	0.4500E-07	3659	0.8121E-02	0.2150E-04	0.6880E-05	0.6652E+01
10	0.5000E-07	3764	0.8998E-02	0.2394E-04	0.7712E-05	0.6772E+01
11	0.5500E-07	3851	0.9781E-02	0.2532E-04	0.5789E-04	0.6447E+01
12	0.6000E-07	3942	0.1058E-01	0.2782E-04	0.5806E-04	0.6391E+01
13	0.6500E-07	4067	0.1147E-01	0.2979E-04	0.5958E-04	0.6422E+01
14	0.7000E-07	4156	0.1234E-01	0.3273E-04	0.6083E-04	0.6540E+01
15	0.7500E-07	4262	0.1313E-01	0.3603E-04	0.6073E-04	0.6239E+01
16	0.8000E-07	4326	0.1388E-01	0.3947E-04	0.6251E-04	0.6383E+01
17	0.8500E-07	4481	0.1480E-01	0.4123E-04	0.6179E-04	0.6304E+01
18	0.9000E-07	4586	0.1565E-01	0.4437E-04	0.6275E-04	0.6158E+01
19	0.9500E-07	4704	0.1652E-01	0.4715E-04	0.6335E-04	0.6629E+01
20	0.1000E-06	4816	0.1739E-01	0.4961E-04	0.6415E-04	0.6614E+01

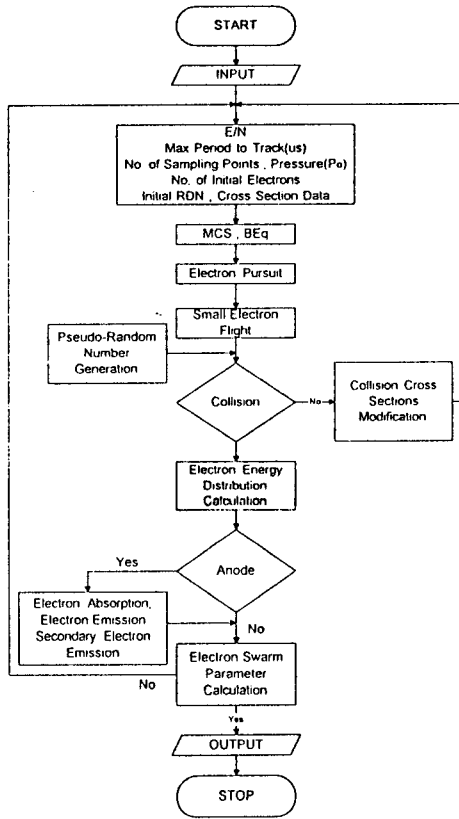


그림 1. 전자 시뮬레이션 흐름도
Fig. 1. Flowchart of the electron simulation.

3. 시뮬레이션의 결과

본 해설에서는 CF₄가스의 탄성 및 비탄성 산란을 고려하여 P₀ = 1Torr에서 전자수 3000개로 하고

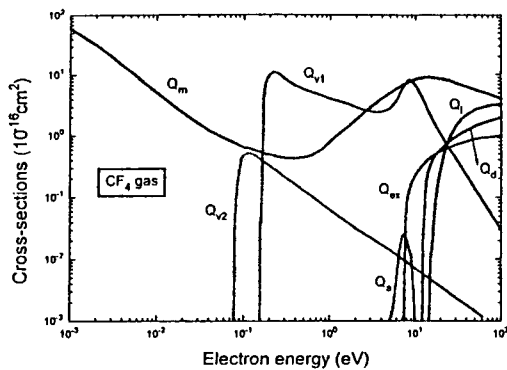


그림 2. CF₄ 가스의 전자충돌단면도
Fig. 2. The collision cross sections of electrons in CF₄ gas.

E/N=1~300 [Td]를 파라미터로하여 전자에너지분포 F(ε)와 전자군 파라미터를 MCS 기법에 의하여 계산한 결과를 보고한다.⁹⁾

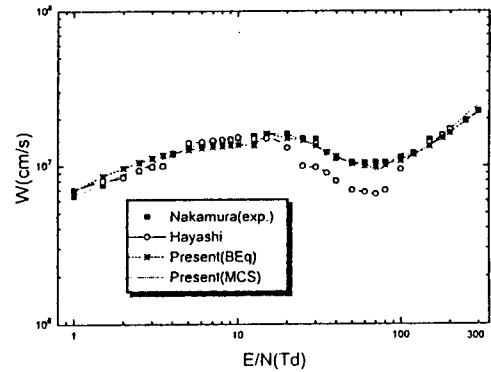


Fig. 3. The drift velocity of electrons in CF₄ gas.
그림 3. CF₄ 가스중에서 전자의 이동속도

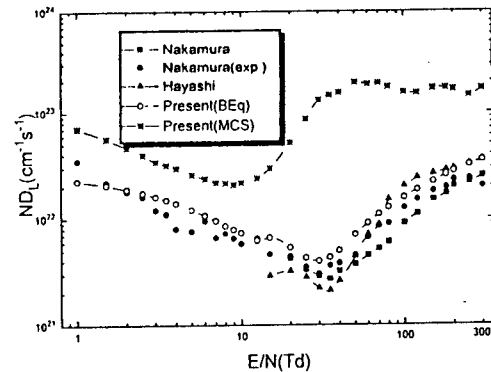


그림 4. CF₄ 가스중에서 확산계수
Fig. 4. The diffusion coefficients in CF₄ gas.

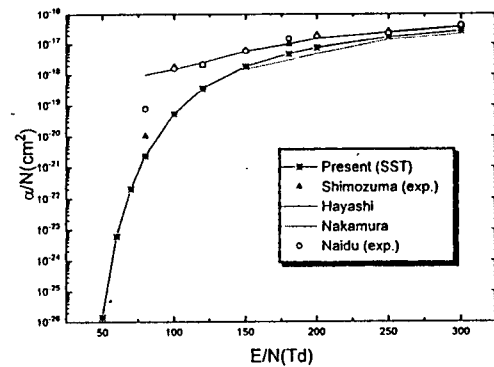


그림 5. CF₄ 가스중에서 전리계수
Fig. 5. The ionization coefficients in CF₄ gas.

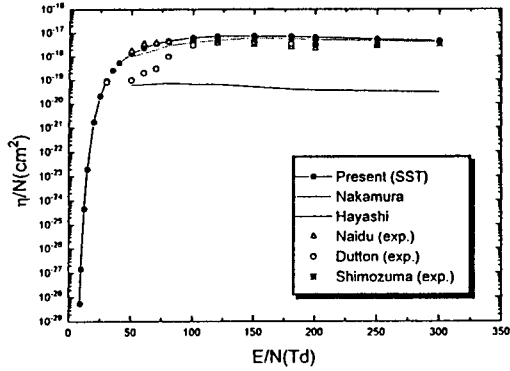


그림 6. CF₄ 가스중에서 부착계수
Fig. 6. The attachment coefficients in CF₄ gas.

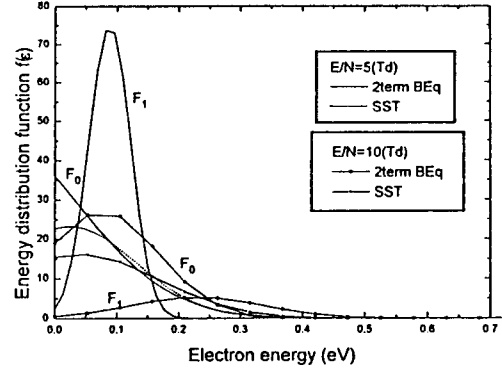


그림 9. CF₄ 가스중에서 전자에너지 분포함수
Fig. 9. The energy distribution function of electrons in CF₄ gas.

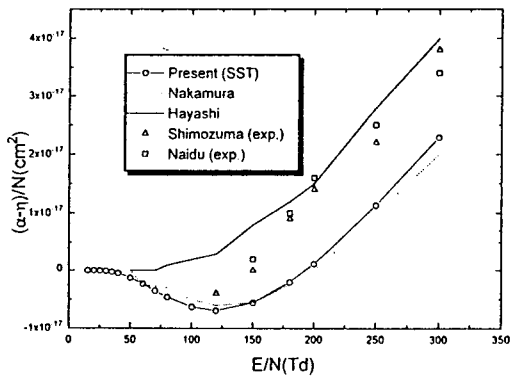


그림 7. CF₄ 가스중에서 실효전리계수
Fig. 7. The effective ionization coefficients in CF₄ gas.

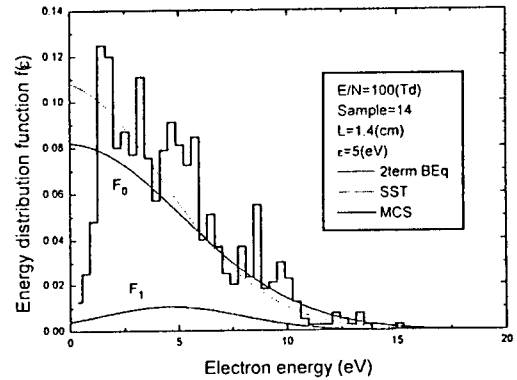


그림 10. CF₄ 가스중에서 전자에너지 분포함수
Fig. 10. The energy distribution function of electrons in CF₄ gas.

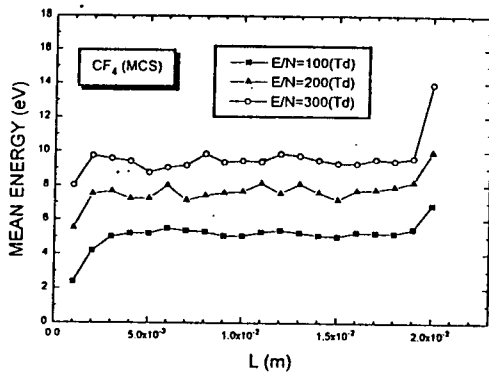


그림 8. CF₄ 가스중에서 전자의 평균에너지
Fig. 8. The mean energy of electrons in CF₄ gas.

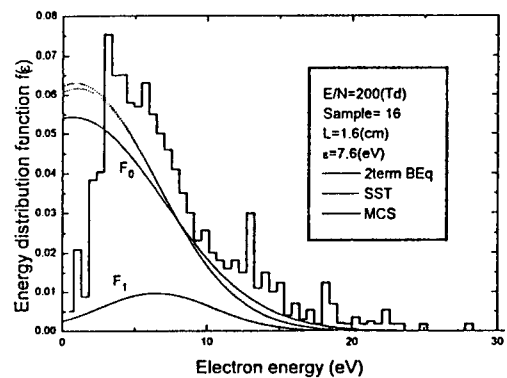


그림 11. CF₄ 가스중에서 전자에너지 분포함수
Fig. 11. The energy distribution function of electrons in CF₄ gas.

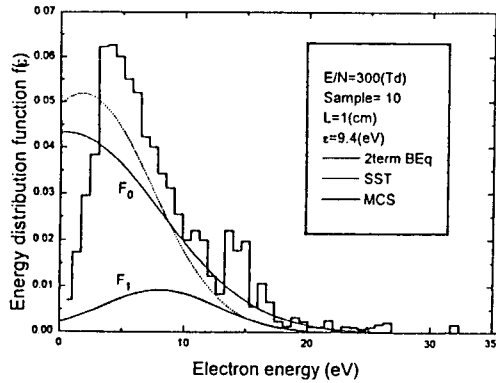


그림 12. CF₄ 가스중에서 전자에너지 분포함수
 Fig. 12. The energy distribution function of electrons in CF₄ gas.

4. 결 론

MCS기법과 그의 기본적인 연구방법과 동향에 대하여 설명하였다. MCS기법은 전자군의 불규칙적인 현상을 모델화하고 의사난수를 반복 이용하여 전자 에너지분포와 수송계수 등 swarm parameter의 값을 실험 없이 실험결과를 구하여 MCS기법의 타당성을 확인하였다. 그리고 MCS기법으로 수송계수의 전자 충돌단면적의 결정과정, TOF 샘플링, 시뮬레이션구성 과정 방법 등에 대하여 해설하였다. 그리고 MCS기법에 의한 수송계수의 계산시간은 적지 않은 시간이 요구되고 있는 것을 알았다. MCS의 이론과 Time of Flight법의 이론 정립으로 전자수송계수의 개선가능성과 plasma를 이용하여 반도체의 박막공정, etching 및 plasma CVD의 기초 자료활용에 기여할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 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.
2. 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.
3. 하성철, 전병훈, 백승권, “몬테 칼로법을 이용한 Ar기체의 전자수송계수에 관한 연구”, 전기전자재료학회지, Vol. 8, No. 6, pp.685-692, 1995.
4. 森 正武. “Fortran 77 數値計算 プログラミング” (岩波書店), pp.41-44, 1995.

5. H. Itoh and T.Musha “Monte Carlo Calculations of Motions in Helium”, J.Phys. soc. Japan, Vol.15, No.9, pp.1675-1680, 1960.
6. R.W.L. Thomas, and W.R.L. Thomas, “Monte Carlo Simulation of electrical discharge in gases”, J. Phys. B. Vol.2, pp.562-570, 1969.
7. 몬테카를로법과 시뮬레이션(培風館), 1989.
8. Y. Sakai, H. Tagashira and S. Sakamoto, “ The development of electron avalanches in Argon at high E/N Values: I Montecarlo Simulation” J.Phys.d:Appl. Phys, Vol10, PP. 1035-1048 (1977)
9. 하성철, 임상원, “CF₄가스의 MCS-BE법에 의한 전자군파라미터 해석”, 동국대학교 산업기술논문집, 第8輯, pp.61-69, 1996.

저자소개

하성철



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

이복희



1954년 6월 29일생. 1980년 인하대학교 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1988년-89년 일본 동경대 생산기술연구소 객원연구원. 현재 인하대학교 전기공학과 부교수.

백승권



1955년 8월 26일생. 1979년 인하대학교 전자공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 일본 게이오대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년-현재 인제대학교 공대 전자공학과 조교수.