SF_6-Ar혼합가스에서의 압력 의존도 해석

The analysis of dependence on the gas number density in SF_6-Ar mixtures

전병훈, 하성철*
(Byung-Hoon Jeon and Sung-Chul Ha*)

Abstract

We measured the electron drift velocity, *W*, in 0.5% SF_6-Ar mixture over the E/N range from 30 Td to 300 Td and gas pressure range from 0.1 to 8 Torr by the double shutter drift tube with a variable drift distance. This coefficient in the mixture was calculated over the same E/N and gas pressure range by using the two-term approximation of the Boltzmann equation. And the measured and calculated values at different gas number density at each *E/N* was appreciable dependence in the results on the gas number density.

Key Words : Electron drift velocity, Gas number density, Electron transport coefficient, SF_6 molecular gas, Two-term approximation of the Boltzmann equation

1. 서 론

플라즈마 현상을 정량적으로 이해하려고 할 때, 또는 목적에 맞는 플라즈마를 만들기 위한 기체의 종류나 혼합비, 기체 압력 등의 평가를 하려고 할 때, 계산기에 의한 시뮬레이션은 유력한 수단이다. 그리고 시뮬레이션이 정량적으로 있기 위해서는 플라즈마를 구성하는 기체와 전자와의 상호작용에 관한 지식, 특히 전자충돌단면적의 정확한 데이터와 개개의 기체분자가 가지고 있는 전자수송계수의 해석은 필수 불가결한 상태이다.

전계중에 존재하는 기체는 방전플라즈마 현상으로 전자군의 성질이 변화하게 되므로 이것을 해석하기 위해서는 전자이동속도, 전리계수, 부착계수, 실효전리계수, 종축확산계수, 횡축확산계수, 평균에너지 및 전자에너지 분포함수를 파악하는 것이 상당히 중요하다. 이러한 연구는 초기에 H.Itoh[1], T.Musha[2], Thomas[3]에 의해 연구되었는데 이것은 방전 공간내에서 나타나는 전체의 전자를 추적하여 전자이동속도 등 전자수송계수의 동향을 조사하여 이들 전자의 물리량을 가상적으로 샘플링(Sampling)하고 그들 하전입자의 운동을 전자계산기로 계산하여 전자수송계수의 특성을 확률적으로 결정하는 것이다.

본 연구에 이용되고 있는 SF_6가스는 전기적 부성기체로 전기 절연 성능과 소호매체로서 매우 우수한 특성을 가지고 있으므로 각종 고전압기기 및 차단기에 광범위하게 이용되고 있으며, 최근 Si계의 에칭가스로서 플라즈마 프로세싱의 중요한 가스의 하나로 이에 대한 기초적 물성연구와 전기적 특성이 요구되어 지고 있다.[4]

본 논문에서는 전자군(Electron Swarm) 방법을 이용하여 SF_6 분자가스의 정확한 전자충돌단면적의 결정과 순수CF_4 분자가스에서의 전자수송계수의 정확한 물성적 해석을 위하여, 30~300 Td에 이르는 E/N 범위에서 가스 압력을 변화시켜 전자이동속도와 종축확산계수를 Double Shutter Drift Tube[5]라는 실험장치를 이용하여 측정하고 이들 값들을 2항

중부대학교 정보공학부 전기전자공학과
(충남 금산군 추부면 마전리 산2-25
Fax : 041-750-6655
E-mail : bhjeon@joongbu.ac.kr)
* 동국대학교 전기공학과
(서울시 중구 필동 3가)

근사 볼츠만 방정식을 이용하여 계산하여 해석하고 있다. 특히 실험과 계산에 의해 구해진 혼합가스의 결과로부터 보여지는 SF_6가스의 압력의존도를 구한 전자이동속도의 결과를 가지고 해석하려고 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에 이용한 실험장치는 크게 진공계, 배기계, 기체 도입계, 측정계로 나누어지고 있으며, 그림 1은 진공계에 해당하는 Double Shutter Drift Tube의 구성도를 보여주고 있다.

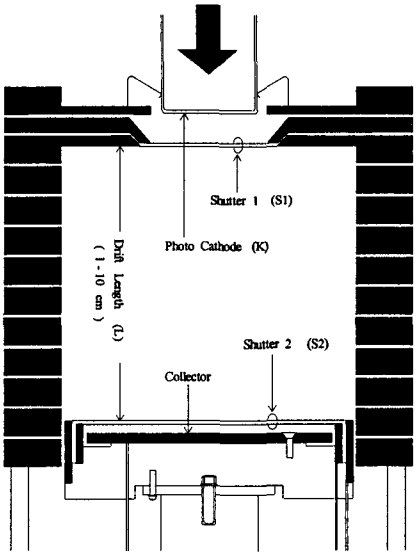

그림 1. Double Shutter Drift Tube의 구성도
Fig. 1. Schematic diagram of Double Shutter Drift Tube

진공계는 U.V Lamp에서의 자외선을 초기전자로 받아 tube내에 공급하는 Photo Cathode(K)와 1 mm 간격으로 구성되어 있는 스테인리스 원판인 2개의 전자 Shutter(S1, S2), Collector(C), 그리고 드리프트 거리를 1~10 cm의 범위에서 가변 할 수 있도록 하고 다이얼 게이지에 의해 조정할 수 있는 10개의 가이드링(GR)으로 구성되어 있다. 콜렉터(C)는 직경 82 mm의 스테인리스 원판이고 GR은 내경 100 mm, 두께 9 mm의 스테인리스 원판으로 전자가 이동영역을 평등전계에서 이동 할 수 있도록 하였다.[5]

측정은 Double Shutter Drift Tube를 이용하여 TOF(Time Of Flight)법으로 하였다. E/N, 기체 압력, 기체 온도 등 의 일정한 조건에서 전극사이에 초기전자를 발생시켜 전리전류를 pico electrometer로 측정하였다. 그리고 진공도와 봉입기체의 압력측정에는 전리진공계와 바라트론 메타를 이용하였다. 본 실험에서 Shutter에 인가된 펄스 폭은 60-350 ns로 펄스전압은 Pulse Generator에 의해 인가되었다.

본 측정에 사용된 0.5 %SF_6-Ar 혼합기체에서 압력 0.1 Torr, 100 Td일 때 이러한 절차에 의해 얻어지는 전자도착 시간분포의 예를 그림 2에서 보여주고, 전자도착분포의 대칭성을 보여주고 있을 때 중심도착시간과 드리프트 거리와의 관계로부터 전자이동속도 값을 구한다.

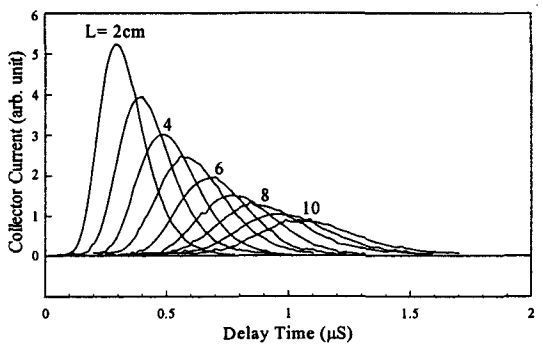

그림 2. 전자도착분포의 한 예(0.1 Torr, 100 Td)
Fig. 2. An example for arrival time distribution of electrons in 0.5%SF_6-Ar mixture(0.1 Torr, 100Td)

3. 2항근사 볼츠만방정식 해석

기체 중에서 하전입자군의 수송계수를 측정하는 방법에는 2항근사와 다항근사 볼츠만 방정식 해법과 몬테칼로 시뮬레이션 기법과 같이 3가지 방법이 있다. 그 중에서도 볼츠만 방정식은 열평형 상태에서가 아닌 다입자계(多粒子系) 운동의 기술에 이용해 이것을 전자군의 거동 해석에 이용하고 있다. 볼츠만 방정식 해석에서는 전자의 거동을 분포함수라고 하는 거시적인 형태로 표시하고, 이 분포함수에서 전자수송계수를 산출한다. 이 방법에서는 충돌의 확률적인 성질을 기초로 하여 전자군 발달(發達)의 통계적 변동은 나타나지 않으며, 통계시간은 비교적 짧다. 그러나, 미적분방정식으로 된 볼츠만 방정식은 일반적으로 그 해를 구하는 것이 어렵고, 종래 많이 사용되어왔다. 전자의 속도분포함수를 Legendre 급수로 전개하고, 그 최초의 2항에 근사하는 2항근사는 전자의 속도분포함수에 비등방성이 강한 경우에는 정확한 전자수송계수를 산출할 수 없는 단점을 가지고 있다.

다음은 본 연구에서 이용된 2항근사 볼츠만 방정식에서 TOF(Time of flight)방법을 이용한 전자수송계수 산출을 보여주고 있다.[6]

TOF에서는 위치와 시간을 함께 지정하기 때문에 샘플 수는 적고 한편으로 에너지분포를 구할 때 샘플 수는 차츰 적어져 통계적 변동을 다수 포함한 결과로 되기 쉽다. 전자 수를 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 샘플 수를 M_k, M_{k+1}로 하고 위치영역을 $Z(t_k)$로 할 때 시간 t_k에서의 전자군 중심의 평균위치 $<Z(t_k)>$는 다음과 같이 식 3.1로 나타낸다.

$$<Z(t_k)> = \frac{1}{M_k}\sum_{j=1}^{M_k} Z_j(t_k) \qquad 3.1$$

전자군의 중심이동속도 W는 다음과 같다.

$$W = \frac{<Z(t_{k+1})>-<Z(t_k)>}{(t_{k+1}-t_k)} \qquad 3.2$$

한편 전자의 확산계수는 시간 t_k일 때 전자의 전계 방향의 중심위치를 $Z_m(t_k)$라하면, 종방향확산계수 D_L은 전자의 전계 방향의 위치분산으로 표현하여 아래의 식과 같이 표현하고, 시간에 대한 기울기로 그 값을 구할 수 있다.

$$\frac{1}{2!M_k}\sum_{j=1}^{M_k}\{Z_j - Z_m(t_k)\}^2 \qquad 3.3$$

한편, 횡방향확산계수 D_T는 전계와 직각방향의 위치분산으로 다음과 같이 표현하고, 시간에 대한 기울기로 구한다.

$$\frac{1}{2}\frac{1}{2!M_k}\sum_{j=1}^{M_k}(r_j^2) \qquad 3.4$$

여기서 r_j는 Z_j의 직각방향 성분이다. 평균에너지($\bar{\varepsilon}$)는 i번째의 에너지를 ε_i라고 하면

$$(\bar{\varepsilon}) = \frac{1}{M_k}\sum_{j=1}^{M_k}\varepsilon_i \qquad 3.5$$

으로 나타낸다.

전자수가 보존되지 않는 경우 즉 전리, 부착이 일어나는 경우에 대해서도 샘플 수 M_k, M_{k+1}등이 변화하는 상태이므로 동일한 방법으로 구할 수 있다.

4. 전자 충돌 단면적

본 논문에서 사용한 SF_6 분자가스와 Ar원자가스의 전자충돌단면적을 그림 3과 4에 나타내었는데 이들 충돌단면적은 전자의 특성을 파악하는 기초 자료로써 상당히 중요하다. 특히 여러 단면적 중에서 절연가스에 관련된 전리와 부착단면적, 에칭에 관련된 여기, 해리 단면적은 충돌단면적에서도 상당히 중요하다.

그림 3의 SF_6의 전자충돌단면적은 이전까지의 다른 충돌단면적과는 달리 많은 부착충돌을 일으키는 단면적으로 구성되어 있다. 이러한 부착의 특성이 강한 형태를 가진 SF_6분자가 그림 4에서 보여주는 Ar가스와의 혼합 시, Ar가스가 가지고 있는 낮은 에너지 범위에서의 Ramsauer Townsend Minimum(RTM)이 보여지는 극소치에서 강한 충돌을 일으키고 가스 밀도, 다시 말해 가스압력에 의존하리라 여겨진다.

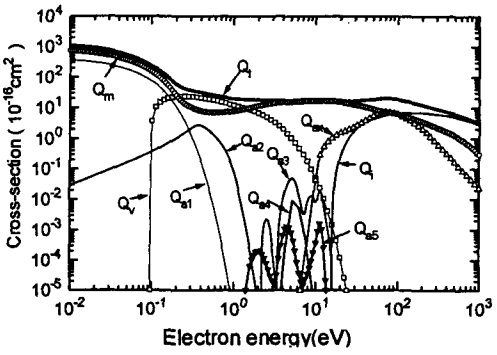

그림 3. SF_6가스의 전자충돌단면적

Fig. 3. The set of electron collision cross sections for SF_6 molecular

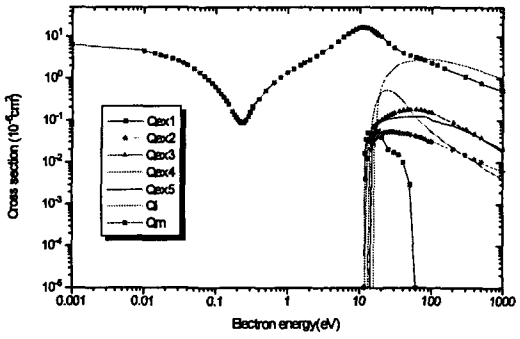

그림 4. Ar가스의 전자충돌단면적

Fig. 4. The set of electron collision cross sections for Ar atom

5. 결과 및 고찰

그림 5의 전자이동속도는 30~300 Td에 이르는 E/N범위에서 0.5%SF_6-Ar혼합가스에서의 실험결과

와 계산결과를 비교하고 있다. 실험결과는 solid기호로 표시하고 있으며, 계산결과는 open기호로 나타내고 있다. 또한 순수 Ar 원자가스의 계산결과를 직선으로 표시하여 함께 보여주고 있다.

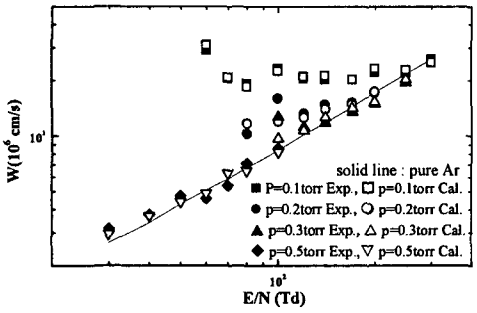

그림 5. 0.5%SF_6-Ar혼합가스에서의 전자이동속도
Fig. 5. The electron drift velocity in 0.5%SF_6-Ar mixture

이 그림에서 보여지는 바와 같이 실험결과와 계산결과는 가스압력에 의존함을 보여주고 있다. 본 그림에서 보여주고 있는 0.5 Torr에서의 실험결과 및 계산결과는 실질적으로 각각 0.5 Torr에서는 100 Td를 1 Torr에서는 70과 80 Td를 2 Torr에서는 60 Td, 3 Torr에서는 50 Td, 4 Torr에서는 40 Td, 8 Torr에서는 30 Td를 측정하고 계산한 값이다. 이러한 값들은 순수Ar가스의 계산 치와 거의 일치함을 보여주고 있으며, 가스압력 0.1, 0.2, 0.3 Torr에서 각각 250, 300 Td와 170, 200 Td, 120, 140 Td는 가스압력에 따른 SF_6가스의 의존도를 보여주고 있다. 이와 같이 SF_6가스와 Ar가스와의 혼합가스에서 이와 같은 가스압력 의존도를 보여주는 것은 앞에서도 설명한 바와 같이 Ar가스의 RTM부근에 가스 밀도 다시 말해 가스 압력에 민감한 성질을 가지고 있는 SF_6가스의 커다란 부착 충돌에 의한다고 볼 수 있다.

6. 결 론

전자군 방법에 의해 0.5%SF6-Ar 혼합기체에서의 전자이동속도를 구하였다. 가스압력을 0.1~8 Torr의 범위에서 가변 시켜가며 Double Shutter Drift Tube를 이용하여 구해진 실험결과와 2항근사 볼츠만 방정식을 이용하여 구한 계산결과에서 가스압력 의존도를 보여주고 있다. 혼합가스에서 보여주고 있는 가스압력 의존도는 Ar가스가 가지고 있는 낮은 에너지 범위에서의 RTM과 그 에너지 범위에서 SF_6가스가 가지고 있는 커다란 부착단면적의 충돌에 의한 현상으로 사료되며 다른 혼합비와 순수 SF_6가스에서의 전자이동속도 외의 전자수송계수에서의 평가가 필요로 한다.

참고 문헌

[1] H. Itoh, Y. Miura, N. Ikuta, Y. Nakao and H. Tagashira, "Electron swarm development in SF_6 : I. Boltzmann equation analysis", J. Phys. D: Appl. Phys. 21, pp. 922-930, 1988.

[2] H. Itoh and T. Musha, "Monte Carlo Calculations of Motions in Helium", J. Phys. Soc. Japan, Vol.15, No.9, pp. 1675-1680, 1960.

[3] 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.

[4] 하성철, 김상남, 휴희영, 서상현, 임상원, 전병훈, "SF6-Ar 혼합기체에서의 전자수송특성 개선에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 11, 1, pp. 67-73, 1998

[5] B. H. Jeon and Y. Nakamura, "Measurement of drift velocity and longitudinal diffusion coefficient of electron in pure oxygen and in oxygen-argon mixtures", J. Phys. D 31, pp. 2145-2150, 1998

[6] 하 성철, 전 병훈, "볼츠만 방정식과 몬테칼로법에 의한 SiH_4-Ar혼합가스의 전자수송계수에 관한 연구", 한국전지전자재료학회지 14권, 2호 pp. 169- 174, 2001