

글로벌 모델에 의한 저온 고밀도 플루오로카본 플라즈마 특성의 공정변수 의존성 해석

이호준*, 태흥식

* 위덕대학교 전기공학과, 경북대학교 전자전기공학부

Analysis of process parameter dependency on the characteristics of high density fluoro carbon plasma using global model

Ho-Jun Lee*, Heung-Sik Tae

Department of Electrical Engineering, School of Electronic and Electrical Engineering

Abstract - Radical and ion densities in a CF4 plasma have been calculated as a function of input power density, gas pressure and feed gas flow rate using simple 0 dimensional global model. Fluorine atom is found to be the most abundant neutral particle. Highly fragmented species such as CF and CF+ become dominant neutral and ionic radical at the high power condition. As the pressure increases, ion density increases but ionization rate decreases due to the decrease in electron temperature. The fractional dissociation of CF4 feed gas decreases with pressure after increasing at the low pressure range. Electron density and temperature are almost independent of flow rate within calculation conditions studied. The fractional dissociation of CF4 monotonically decreases with flow rate, which results in increase in CF3 and decrease in CF density. The calculation results show that the SiO2 etch selectivity improvement correlates to the increase in the relative density of fluorocarbon ion and neutral radicals which has high C/F ratio.

1. 서 론

고집적 반도체 소자 제조에 있어서 플라즈마를 이용한 건식 식각이나 화학기상증착은 매우 중요한 공정이다. 이러한 공정에 있어서 플라즈마 내의 물리, 화학적 특성은 표면 반응에 직접적인 영향을 미치고, 최종 결과를 결정짓는 가장 중요한 요소이다. 플라즈마의 제 특성은 매우 많은 변수들에 의해 결정되고 그 변화가 복잡하므로 실제 공정 개발은 주로 실험을 통한 통계적 최적화로 이루어지고 있다. 그러나 투입 전력량, 가스 압력 및 유량, 바이어스 전위 등 제어 가능한 여러 변수들에 대한 공정 특성의 변화를 직접 관측 함으로서 최적조건을 확립하는 실험적 방법에서는 플라즈마 반응기 내부를 블랙 박스와 같이 취급하므로 개발된 공정을 향상시키거나 새로운 공정에 적용하는데 어려움이 있고, 비용이 많이 든다. 따라서 공정변수에 대한 플라즈마 내부 변수(활성종, 이온종의 밀도등) 변화의 이해 및 예측은 효과적인 공정 개발을 위하여 매우 중요하며, 이를 위해 각 활성종의 특성 진단이나 시뮬레이션 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 글로벌 모델[1]을 사용하여, 산화막 식각등에 쓰이는 CF4 플라즈마내의 전자 온도, 전자 밀도, 각종 라디칼 및 이온종 밀도를 계산하고 입력 전력, 가스 압력, 가스 유량 등의 공정 변수에 대한 의존성을 조사하였으며 저압, 고밀도 플라즈마에 있어서 각 화학종들과 선택적 SiO2/Si 식각 간의 관계를 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 글로벌 모델 및 계산과정

계산의 대상이 되는 물리량은 전자 온도, 밀도 및 각 이온 및 중성 종의 체적 적분값이다. 이들은 기본적으로 에너지 평형식과 입자 보존식으로부터 구해진다. 플라즈마는 중성이며 전자는 맥스웰 분포를 가진다고 가정한다. 외부에서 투입된 전력은 전자와 이온의 에너지 손실율과 균형을 이루어야 하며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{abs} = \sum_{i=1} P_{iw,i} + P_{ew} + P_{ev} \quad (1)$$

여기서 P_{abs} , $P_{iw,i}$, P_{ew} , P_{ev} 는 각각 투입 전력량, 이온 및 전자의 벽 손실에 의한 에너지 손실율, 충돌에 의한 플라즈마 체적 내에서의 전자 에너지 손실율이다.

하전 입자의 보존식은 비대칭 하전 입자 교환 충돌과 플라즈마 체적 내에서의 재결합을 무시하고, 이온화 충돌에 의한 전자-이온 쌍의 생성률(n_i)과 sheath에서 이온의 손실율과의 평형으로부터

$$Vn_e v_{iz,i} = An_{is} U_{B,i} \quad (2)$$

와 같이 쓸 수 있다. V , A , n_e , n_{is} 및 $U_{B,i}$ 는 플라즈마 체적, 손실면적, 전자밀도, sheath boundary에서의 이온밀도 및 Bohm 속도($(eT/m_i)^{1/2}$)를 각각 나타낸다. 식(2)를 이용하여 에너지 평형식을 이온 밀도와 함께 표현하면 식(3)을 얻는다.

$$P_{abs} = \sum_{i=1} en_i (A_{eff} \epsilon_{T,i} U_{B,i}) \quad (3)$$

여기서 $\epsilon_{T,i}$ 는 전 충돌 에너지 손실을 하나의 i 번째 이온종 생성률로서 정규화한 값이며 이것은 해당 이온종을 생성시키는 중성 입자들과 전자의 충돌당 에너지 손실을 포함하고 있다. 이온의 손실 면적은 Godyak[3]이 제안한 해석식으로부터 도출된, sheath 형성을 고려한 효과적인 손실 면적 A_{eff} 을 사용한다.

R , L 및 l_i 는 각각 용기의 반경, 길이 및 이온의 평균 자유 경로 ($=1/(n_{neu} \sigma_c)$)이다. 본 논문에서는 각 이온종에 대하여 같은 A_{eff} 값을 사용하였고 이온-중성입자의 탄성 충돌 단면적은 아르곤 이온의 저 에너지 근사값 ($\sigma_c = 5 \times 10^{-19} \text{ m}^2$)을 사용하였다. 계산에 사용된 용기의 크기는 반경 및 길이가 각각 0.16 m 및 0.2 m 이다.

각 입자들의 밀도는 입자 보존식의 일반형태

$$\frac{dn_i}{dt} = G_i - L_i \quad (4)$$

의 정상상태 해로부터 구한다. 예를 들어, CF4의 생성률(G)은 외부에서 공급되는 유량에 의해 결정되며 손실

항(L)은 이온화, 해리, 배기손실 등이 포함되고 CF3는 CF4로 부터의 해리, CF3+의 벽면 중성화가 생성항이 되고, CF2, CF로의 해리, 이온화, 배기 등이 손실항이 된다. 중들의 생성율은 전자온도의 함수이므로 식(3)과 (4)는 비선형 다원방정식의 형태가 된다. 계산과정에서 전력 밀도, CF4의 유량은 상수로 주어지며 용기 압력은 펌핑 손실항의 조절에 의해 일정하게 유지되어지는 입력 변수이다. 이와 같은 변수 설정은 실제 공정에서 해리 등에 의한 용기 압력의 변화가 배기 밸브의 피드백 제어를 통해 미리 설정된 값으로 유지되는 것에 해당한다. 펌핑 손실항의 변화는 입력 조건에 따라 차이를 보이는데 대체적으로 CF4의 총 해리율과 반비례관계에 있다. 총해리율이 50%에서 90%정도 까지 변화할 때 해리에 의한 압력의 증가량은 1.5에서 3배 정도로 나타났다. 벽에 도달하는 이온들은 완전히 중성화 되어 다시 플라즈마 영역으로 되돌아 간다고 가정한다. 플라즈마 영역 밖으로의 중성 입자의 손실은 배기 손실만을 고려하였다. 각 중성 입자들은 300 K의 온도도를 가지는 이상 기체(ideal gas)로 가정 되었다. 따라서 압력은 용기내 입자 수와 정비례의 관계에 있다.

2.2 결과 및 토의

2.2.1 투입전력 의존성

그림 1은 일정 압력, 유량 하에서 투입 전력의 변화에 따른 여러 중들의 변화를 보여준다. 하전 입자의 밀도는 입력 전력의 증가와 함께 선형적으로 증가하며 전자 온도는 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 전자의 온도는 입자 보존식(4)에 의해 결정이 되므로 전자 밀도 또는 입력 전력과는 직접적인 상관 관계가 없다. 그러나 입력 전력에 따라 플라즈마내 입자중의 변화가 있을 경우는 각 중들의 서로 다른 eT_i (collisional energy loss per e-i pair generation)값에 의해 전자 온도가 변화할 수 있다. 그러나 본 계산 영역에서는 그 효과가 매우 약하였다. 저 전력 조건에서는 CF3+, 높은 입력 전력에서는 CF+가 가장 높은 밀도를 보여주고 있는데 이는 해리율의 증가에 따른 어미 중성입자의 밀도 변화가 반영된 결과이다. 중성 F의 밀도가 가장 높음에도 불구하고 F+이온의 밀도는 전체 이온밀도의 5% 정도만을 차지하고 있다. 이는 다른 중들에 비해 F의 이온화에너지가 매우 높기 때문이다. 반면 이온화 에너지가 낮고 이온화 충돌 단면적이 큰 C의 경우 중성 입자 밀도는 낮지만, 고 전력 영역에서는 오히려 F+보다 높은 밀도를 보여 주고 있으며 전력 증가에 따라 가장 빠르게 증가 함을 볼 수 있다. 특히 낮은 질량으로 인해 이온 전류 밀도에서 C+가 차지하는 비중은 전력 증가와 함께 가파르게 상승함을 볼 수 있다. 플라즈마 공정에서 기판에 직접적인 영향을 주는 물리량이 이온 전류 밀도임을 생각하면 CFx+ (x=1,2,3) 중들뿐 아니라 C+의 역할도 매우 중요할 것으로 생각된다.

그림 2는 중성 입자밀도의 입력 전력 의존성을 보여준다. 공급 가스인 CF4는 입력 전력이 증가함에 따라 해리 및 이온화 해리로의 손실이 커지므로 그 밀도가 계속 감소한다. CF4의 전체 해리율은 입력 전력 밀도 40 mW/cm³에서 90%에 도달함을 볼 수 있다. C, F와 같이 해리 손실 경로가 없는 중들 및 CF는 지속적인 증가의 경향을 보인다. 해리 과정의 중간 생성물인 CF3, CF2 라디칼 들은 입력 전력에 따라 그 밀도가 초기에는 증가하다가 다시 감소한다. CF3가 가장 낮은 전력 값에서 감소하기 시작하고 CF2는 20mW/cm³ 이후부터 완만하게 감소한다. 그러나 앞 장에서 언급한 바와 같이 벽면에서의 재결합 항을 고려할 경우 전체 해리율이 조금 낮아지고 CF, CF2, CF3가 증가하는 전력 영역이 좀더 확장 될 것이다. 전체적으로 저전력 조건에서는 CF4, CF3, F 입자들이 주종을 이루며 고전력 조건에서는 F, CF가 가장 중성입자중 가장 많은 부분을 차지한다.

2.2.2 공정압력 의존성

그림 3은 압력 변화에 따른 각 중성 입자들의 밀도 변화를 보여준다. 전체 중성 입자 밀도 증가에 따라 각각 라디칼의 밀도 역시 증가한다. 전 압력 영역에서 F가 반응성 입자들 중에서 대다수를 차지하며 CF4의 해리율은 증가 후 2mTorr를 정점으로 다시 감소하는 양상을 보인다. 해리율의 감소는 전자온도의 감소에 의한 것으로 판단된다. 그림 4는 이온 선속 및 전자 온도의 변화를 보여준다. 전자 온도는 압력 증가에 따라 단조 감소를 볼 수 있는데 이는 대부분의 약 전리 플라즈마에서 관측되는 일반적인 현상이다. 이 현상은 전자의 관점에서 볼 때 전자 중성입자 간의 충돌 주파수가 낮아짐에 따른 전자 에너지의 손실 감소의 결과이다. 총 하전 입자의 밀도는 압력이 증가함에 따라 증가 하는 경향을 보여주고 있다. 이는 압력 증가에 따른 효과적 손실면적(A_{eff}) 및 Bohm 속도($u_{B,i}$)의 감소에 의한 이온의 손실을 감소 및 중성입자의 증가에 기인한 것이다. 반면, 이온화 반응 계수는 압력이 증가함에 따라 감소하는데 이것이 다른 요인들 보다 커지는 경우는 압력 증가에 따른 하전 입자 밀도의 감소가 일어나리라 예상된다. 본 계산 조건에서의 이온화율은 0.5 mTorr에서 약 0.2%, 20 mTorr에서 0.02%이다. 이온밀도는 전 압력 영역에서 CF3+이 가장 높고, 그 수가 가장 적은 C+의 증가율이 가장 크게 나타났다.

2.2.3 유량 의존성

그림 5는 일정한 입력전력과 공정 압력에서 공급 유량의 변화에 따른 각 중성입자 및 하전입자의 밀도와 전자 온도 변화를 보여 주고 있다. 전자의 온도와 밀도는 거의 변화가 없으며 유량이 증가함에 따라 전체적으로 해리율이 감소하고, 이에 따라 CF4, CF3의 증가 및 CF, F, C의 감소 경향을 확인할 수 있다. 전자온도 및 밀도가 거의 일정하게 유지되기 때문에 이온 중들의 밀도 변화 경향은 각각 그 어미 중성입자의 밀도 변화를 거의 그대로 따라 감을 알 수 있다.

3. 결 론

간단한 글로벌 모델을 사용하여 CF4 플라즈마 내에서의 각종 중성입자 및 이온의 밀도를 계산하였다. 입력 전력의 증가에 따라 하전 입자의 선형적인 증가와 CF4 해리율의 증가를 확인하였다. 해리율의 증가에 따라 CF, CF+ 등과 같은 저분자 입자의 비율이 상대적으로 증가 한다. 중성입자로는 F가 주종을 이루며 저전력 조건에서는 CF3+, 고전력 조건에서는 CF+ 이온의 수가 가장 많다. 압력 변화에 따라 각 중성입자가 차지하는 비율은 크게 변화하지 않고, 하전 입자의 밀도는 증가한 반면 이온화율은 감소 한다. 유량의 증가에 따라 하전입자 밀도 및 전자의 온도는 거의 변화 하지 않으며 전체 해리율은 감소 한다. 계산 결과 및 실험에서 얻어진 SiO₂/Si 식각 선택도 경향은 고선택 산화막 식각에 있어서, 높은 C/F 비를 갖는 중성 플루오로 카본 라디칼 뿐만 아니라 플루오로 카본 이온의 중요성을 보여준다.

(참 고 문 헌)

- [1] C. Lee, M.A. Lieberman, J. Vac. Sci. Technol. A 13(2), 368 (1995)
- [2] C. Lee, D.B. Graves, M.A. Liebermann and D.W. Hess, J. Electrochem. Soc. 141, 1546 (1994)
- [3] M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, Principles

- (Wiely, New York, 1994) p.140
 [4]R.A. Bonham, Jpn. J. Appl. Phys. 33, 4157 (1994)
 [5]L.D.B. Kiss and H. H. Sawin, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 12, 523 (1992)
 [6]D. M. Manos, D.L. Flamm, *Plasma Etching: An Introduction* (Academic, San Diego, 1989)
 [7]H.J. Lee, J. K. Kim, J. H. Kim, J. H. Kim, J. H. Joo and K.W. Whang, J.Vac. Sci.Technol. B 16(2), 500 (1998)
 [8]H.J Lee, J.H. Kim, J. H. Joo and K.W. Whang, J. Vac. Sci. Technol. A, 14(3), 1007 May/Jun (1996)

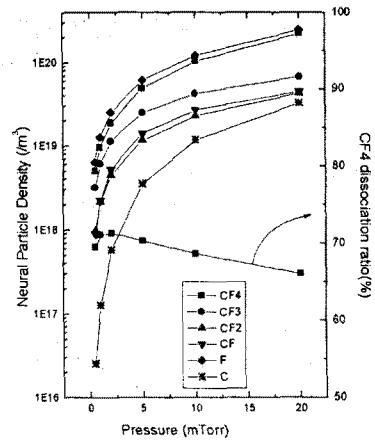


그림3 압력 변화에 따른 중성 입자 밀도 변화

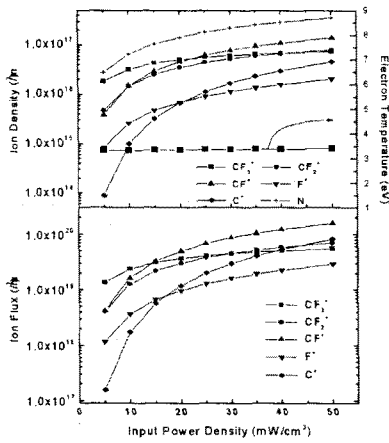


그림1.이온밀도 및 전자온도의 입력 전력 의존성

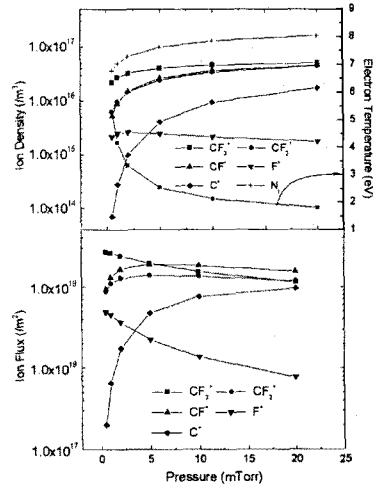


그림4.이온밀도 및 전자온도의 공정 압력 의존성

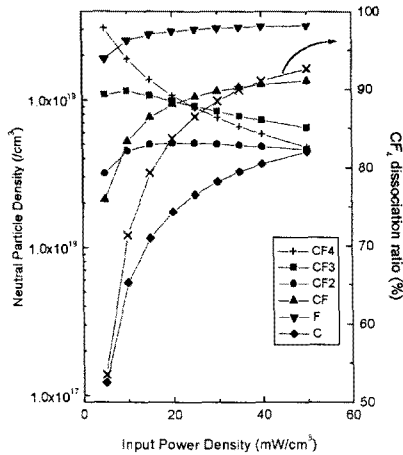


그림2.중성입자 밀도의 입력 전력 의존성

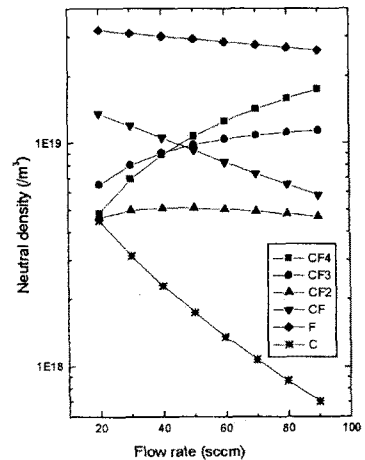


그림5.유량 변화에 따른 중성 입자 밀도 변화