

Ar 플라즈마 상태에서 PLAD법에 의한 탄소 입자의 운동 모델링

(Modeling of Carbon Plume in PLAD Method Assisted by Ar Plasmas)

소순열* · 임장섭

(Soon-Youl So · Jang-Seob Lim)

요 약

고본 논문에서는 시뮬레이션 기법을 통하여 PLAD법을 Ar 플라즈마 상태에서 구동하도록 설정하였다. 이것은 플라즈마를 구성하는 요소들이 PLAD법에 의해 방출된 각 입자들에 어떠한 영향을 미치는가를 확인하고자 하였으며, 특히 방출된 입자들의 운동 에너지 및 밀도를 제어할 수 있을 것으로 기대되어지기 때문이다. Ar 플라즈마의 방전 공간내에서, PLAD법에 의한 전자, 탄소 이온(C^+) 및 탄소 원자(C)의 운동 과정을 보다 정확히 계산하기 위해서 입자 및 유체 모델을 융합한 1차원 하이브리드 모델을 개발하였다.

그 결과 쉬스 내에 형성되는 전위를 제어함으로써 기판에 도달하는 C^+ 의 밀도 및 에너지를 제어할 수 있는 것으로 기대되어졌다.

Abstract

A pulsed laser ablation deposition(PLAD) technique has been used for producing fine particle as well as thin film at relatively low substrate temperatures. However, in order to manufacture and evaluate such materials in detail, motions of plume particles generated by laser ablation have to be understood and interactions between the particles by ablation and gas plasma have to be clarified. Therefore, this paper was focused on the understanding of plume motion in laser ablation assisted by Ar plasmas at 100[mTorr]. One-dimensional hybrid model consisting of fluid and particle models was developed and three kinds of plume particles which are carbon atom(C), ion(C^+) and electron were considered in the calculation of particle method. It was obtained that ablated C^+ was electrically captured in Ar plasmas by strong electric field(E). The difference between motions of the ablated electrons and C^+ made E strong and the collisional processes active. The energies of plume particles were investigated on a substrate surface. In addition, the plume motion in Ar gas was also calculated and discussed.

Key Words : laser ablation, carbon plume modelling, Ar plasmas

* 주저자 : 전남대학교 전기공학과
Tel : 061-240-7122, Fax : 061-240-7283
E-mail : janylim@mmu.ac.kr
접수일자 : 2005년 1월 25일
1차심사 : 2005년 1월 31일
심사완료 : 2005년 3월 10일

1. 서 론

현재, 레이저 용삭 기술(PLAD)을 이용하여 탄소 계 소재의 탄소 박막, Diamond-like-carbon 및 CN

필름 등을 증착하는 연구가 많은 관심을 불러오고 있다[1,2]. 특히, 상대적으로 낮은 온도에서 고속으로 위와 같은 필름을 증착할 수 있는 장점을 가지고 있어, 최근에 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나이다 [3,4]. PLAD법은 탄소계 재료의 표면에 레이저를 조사하면, 이 레이저의 에너지를 재료가 흡수하게 되고, 재료 표면에서 국부적으로 가열되면서 탄소계의 입자들이 표면으로부터 증발하여 기판에 증착하는 과정으로 설명되어진다[5]. 이 과정에서 주된 프로세스는 기판에 증착되기 까지의 버퍼 가스와 증발된 탄소계 입자와의 충돌 및 화학작용이라 할 수 있다. 그러나 PLAD법을 이용하여 목적하는 박막을 형성하기 위해서는 재료 표면에서 레이저에 의해 방출된 각 입자들의 운동을 세밀하고 분명하게 분석해야 하며, 또한 방출된 탄소계 입자들의 운동 에너지 및 분포를 제어하는 것이 중요하다고 할 수 있다[6,7,8]. 특히 재료 표면에서 방출된 이온의 에너지에 의해서, 기판에 증착된 박막은 정질 및 비정질 등의 다양한 결합 구조로 이루어지는 것을 볼 수가 있다. 따라서 적절한 이온의 운동 에너지 제어 및 버퍼 가스와 상호 충돌 반응의 선택성 등이 주요한 연구 과제로 부각되고 있다.

본 논문에서는 시뮬레이션 기법을 통하여 PLAD법을 Ar 플라즈마 상태에서 구동하도록 설정하였다. 이것은 플라즈마를 구성하는 요소들이 PLAD법에 의해 방출된 각 입자들에 어떠한 영향을 미치는가를 확인하고자 하였으며, 특히 방출된 입자들의 운동 에너지 및 밀도를 제어할 수 있을 것으로 기대되어 지기 때문이다. Ar 플라즈마의 방전 공간내에서, PLAD법에 의한 전자, 탄소 이온(C⁺) 및 탄소 원자(C)의 운동 과정을 보다 정확히 계산하기 위해서 입자 및 유체 모델을 융합한 1차원 하이브리드 모델을 개발하였다. 하이브리드 모델은 유체 및 입자의 각 모델 결과를 서로간의 피드백 프로세스에 의해서 결합된 형태를 이룬다. 유체모델을 이용하여 Ar 플라즈마의 시·공간적 특성을 분석하였으며, Ar 플라즈마가 주기적 정상상태에 도달하게 되면 레이저(ArF)를 통한 Graphite의 용삭을 행하였다. 그 후 Ar 플라즈마의 공간 분포하에서 입자 모델을 이용하여 탄소계 재료(Graphite)로부터 증발된 전자, C⁺

및 C의 세 종류의 입자의 움직임을 계산하였고, 각 입자들의 운동 및 기판 부근에서의 에너지 분포를 조사하였다. 또한 Ar 가스 분위기 중에서의 입자 운동과도 비교·분석하였다.

2. 모델링

2.1 기본 방정식

본 시뮬레이션에서는 볼츠만 방정식에서 구해지는 전송방정식을 기본으로 한 1차원 유체 모델을 이용하여 Ar 플라즈마의 계산을 행하였다. 그림 1에 Ar 가스의 전자 충돌 단면적을 나타내었다. 이 데이터는 Sakai 등의 결과를 인용한 것이다[9].

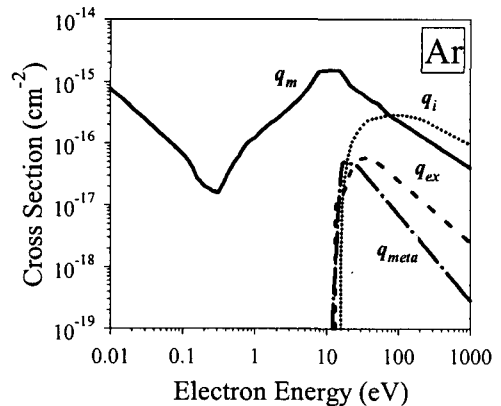


그림 1. Ar 가스의 전자 충돌 단면적(q_m , 모멘트; q_i , 전리; q_{ex} , 여기; 그리고 q_{meta} , 준안정여기 상태)
 Fig. 1. The present cross section set for Ar: q_m , momentum transfer; q_i , ionization; q_{ex} , excitation; and q_{meta} , metastable state

유체 모델은 각 하전입자의 연속방정식, 전자 에너지 보존 방정식 및 포아송 방정식으로 구성되어진다. 대전입자의 전송의 식을 아래에 표시하였다.

$$\frac{\partial N_j}{\partial t} = -\frac{\partial \Gamma_j}{\partial x} + S_j \quad (1)$$

$$\Gamma_j = s\mu_j N_j E_j - D_j \frac{\partial N_j}{\partial x} \quad (2)$$

여기서 j는 전자 및 양이온을 나타낸다. N_j 는 각

Ar 플라즈마 상태에서 PLAD법에 의한 탄소 입자의 운동 모델링

하전입자의 밀도, S_j 는 전자 충돌 및 화학 반응에 의한 각 입자의 발생 및 소멸 항을 나타낸다. 또한 Γ_j 는 입자속(flux), D_j 는 확산 계수, v_{j0} 는 이동도, E 는 전계를 나타낸다. s 는 전자의 경우 -1 , 이온의 경우 $+1$ 을 나타낸다.

전극방향으로 입사하는 전자속은 전자 열속도의 함수로 결정되어진다. 그리고, 전극 면으로 향한 전자는 전부 흡수되는 것으로 가정하였다. 전극 면 에너지 및 전자 2차 방출 계수를 $0.5[eV]$, 0.01 로 설정하였다. 평균 전자 에너지 및 전계의 함수로 구해지는 각 파라메타를 결정하기 위해, 연속방정식에 에너지 보존식 및 포아송 방정식이 포함되어 진다.

$$\frac{\partial(\epsilon \cdot N_e)}{\partial t} + \frac{\partial q_e}{\partial x} = -\Gamma_e e E - \sum_k H_k \cdot R_k \quad (3)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4)$$

여기서 q_e 는 엔탈피 유속(e 는 전자 전하), H_k 는 전자 충돌에 의한 에너지 손실, R_k 는 반응 계수, k 는 전리 및 여기 반응을 나타낸다. V 는 전극 전위, ρ 는 실전하 밀도, ϵ_0 는 진공 유전율을 나타낸다.

Ar 플라즈마가 주기적인 정상상태에 도달하게 되면, PLAD법에 의해서 증발된 입자의 운동을 입자 모델을 통하여 계산한다. 입자 모델은 (1) 입자의 비행 시간 결정 ($\tau = -\frac{1}{C} \ln(1-\xi)$), (2) 입자 운동의 추적 ($v = v_0 + \frac{eE}{m} \tau$), (3) 충돌의 판단 (ξ), (4) 충돌 후의 운동 방향 결정 ($\cos \theta = 1 - 2\xi_\theta$, $\xi_\theta = \frac{1}{2\pi} \phi$) 및 (5) 충돌 후의 속도 및 에너지 결정 ($\epsilon' = \epsilon - \delta\epsilon$)에 의한 과정으로 수행되어 진다. 여기서 ξ 는 랜덤 상수이며, θ 및 ϕ 는 산란각 및 방위각을 나타내며, ϵ 및 $\delta\epsilon$ 는 운동 에너지 및 충돌 후의 에너지 손실을 나타낸다.

2.2 챔버 및 외부 회로

평행 평판 전극에 커패시터를 직렬 연결한 용량결합형 플라즈마(CCP)의 모델을 그림 2에 나타내었다.

전극 간격은 $Z=2.0[cm]$, 방전 여기 RF 전원 주파수는 $13.56[MHz]$, 전원 전압은 $V_{rf}=300[V]$, 가스온도는 $T=300[K]$ 로 설정하였다. 또한 블로킹 콘덴서 용량은 $C_b=40[pF]$, 가스압력은 $P=100[mTorr]$ 로, 전극의 반경은 $R=5.0[cm]$ 로 설정하였다. 하부 전극($z=0.0[cm]$)에 탄소계 재료(Graphite)가 놓여져 있으며, 상부 전극($z=2.0[cm]$)에 전원을 공급하도록 설정하였다. 전극간에 인가되는 방전 전압(V_g) 및 전류(I_g)는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$V_g = \frac{C_b}{C_b + C_g} V_{rf} - \frac{1}{C_b + C_g} \cdot \int_0^t I_g dt \quad (5)$$

$$I_g = \frac{e}{V_g} \int_v (\Gamma_p - \Gamma_e) \cdot E_s dv \quad (6)$$

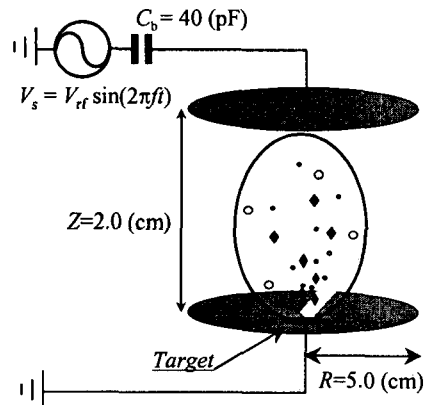


그림 2. CCP 모델의 외부 회로 및 방전 챔버의 모식도
전극간 거리 $Z=2.0(cm)$, 전극 반경 $R=5.0(cm)$, 블로킹 커패시터 $C_b=40(pF)$, 가스압 $P=100(mTorr)$ 그리고 주파수 $RF=13.56(MHz)$

Fig. 2. External circuit and electrode configuration of the present CCP model. The discharge gap $Z=2.0(cm)$, the radius of electrode $R=5.0(cm)$, the blocking capacitor $C_b=40(pF)$, Ar gas pressure $P=100(mTorr)$ and the frequency of the RF power source is $13.56(MHz)$

2.3 시뮬레이션 조건

본 연구에서는 ArF 레이저($\lambda=193nm$, $\tau=20[ns]$ 및 레이저 선량= $3.0J/cm^2$)가 Graphite 타겟에 입

사하는 것으로 고려하였으며, 이러한 ArF 레이저 범위에서는 $C_n(n=1\sim3)$ 의 분자가 주류를 이루어 방출되는 것으로 보고되고 있다[10,11]. 본 연구에서는 전자, 탄소 이온(C^+) 및 탄소 원자(C)의 세종류 입자들을 고려하였으며, 각각의 초기 에너지는 실험 결과를 통하여 얻어진 값으로 10 및 100([eV])로 설정하였다[12].

Ar 원자와 탄소 이온 및 원자와의 충돌 단면적은 각각의 원자 반경으로부터($\pi(r_1+r_2)^2$; r_1 은 Ar 원자의 반경 1.91×10^{-8} [cm], r_2 는 C 원자의 반경 0.77×10^{-8} [cm]) 계산하였고, 충돌 후의 산란각은 $\cos \theta$ 로 설정하였다.

탄소 입자들의 움직임은 입자 모델로부터 3차원 좌표계를 이용하여 계산하였으며, 이 입자들의 초기 운동 방향은 z축으로 한정하였다(0, 0, z).

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 Ar 플라즈마의 정상상태

그림 3은 주기적 정상상태인 Ar 플라즈마의 전자(N_e), 이온(N_p), 전계(E) 및 전위(V)의 시·공간 분포를 보여주고 있다. 일반적으로 전자는 전극 부근에서 RF 전계의 변화에 대응하여 변동하는 것을 볼 수 있다(그림 3 (a)). 이온의 시간적 변화는 RF 전계의 변화에 비해 늦으므로, 양 전극 부근에서의 밀도는 전자보다 높게 형성되고 전극 중앙에서는 전자와 거의 비슷한 밀도 즉, 전기적으로 중성상태를 형성하게 된다(그림 3 (b)). 이러한 전자 및 이온의 움직임의 차이로부터 그림 3 (c)와 같이 전극 부근에서는 높은 공간 전하 전계가 형성되고, 중앙부에서는 거의 제로에 가까운 분포를 보여주고 있다.

이온의 움직임이 양 전극 방향으로 확산을 통하여 이동하는 것으로부터, 공간 전하 전계도 양 전극 방향으로 향하는 것을 알 수 있다. 이러한 공간 분포는 입자 모델에 피드백되어 Graphite로부터 방출된 각 입자들의 공간적 움직임에 지대한 영향을 끼치는 것으로 고려되어진다. 또한 그림 3 (d)와 같이, 쉬스 영역에서는 100[V]에 가까운 전위가 분포되어 있어,

100[eV]의 초기 운동 에너지를 가진 입자들의 운동 및 충돌 반응에 미치는 영향을 보다 자세히 이해·분석하는 것이 중요하다 할 수 있으며, 3.3절에서 상세히 조사하였다. Ar 플라즈마가 주기적인 정상상태에 도달하게 되면, PLAD법에 의해 Graphite에서 방출된 입자들의 움직임을 입자 모델(Monte Carlo method)을 이용하여 시뮬레이션을 행한다. 여기서 주요한 충돌 프로세스는 표 1과 같다.

표 1의 E1과 E2는 Ar 원자와 C 및 C^+ 입자들과의 탄성 충돌 프로세스를 나타내며, E3은 Graphite에서 방출된 전자와 Ar 원자와의 전리 프로세스를, E4는 Ar 플라즈마 중의 전자와 탄소 원자와의 전리 프로세스($E_{\text{threshold}} = 11.271$ ([eV]))를 보여주고 있다.

표 1. Ar 플라즈마 중에서의 탄소 입자와의 주요한 충돌 프로세스
Table 1. The main collision processes in Ar plasmas between carbon particles and Ar atom

| | Collisions | Reactions |
|----|-------------------|------------------------------|
| E1 | Elastic collision | $C^+Ar \rightarrow C + Ar$ |
| E2 | Elastic collision | $C^+Ar \rightarrow C^+ + Ar$ |
| E3 | Ionization | $Ar+e \rightarrow Ar^+ + 2e$ |
| E4 | Ionization | $C+e \rightarrow C^+ + 2e$ |

3.2 Ar 가스 분위기 중에서의 입자 운동

본 모델에서는 Ar 가스압 100[mTorr]에서 레이저 조사후의 3[μ s]동안 각 입자들의 움직임을 계산하였으며, 각 입자들의 샘플링 수는 10,000개로 설정하였다. 실험 결과에서 얻어진 각 입자들의 밀도는 10^{18} [cm^{-3}]로^[13], 본 모델에서도 동일하게 설정하였으며, 본 결과는 입자 모델만으로 해석되었다.

그림 4는 Ar 가스 분위기 중에서 레이저 조사후의 Graphite에서 방출된 C 원자 및 이온의 시간 변화에 따른 공간적 분포를 보여주고 있다. Ar 가스 분위기 중에서는 Ar 원자와의 충돌 반응을 제외하면, Graphite로부터 방출된 전자 및 탄소 입자들의 움직임에 영향을 미치는 요소가 없는 관계로 C 및 C^+ 의 시·공간적 움직임은 거의 비슷하게 형성됨을 알 수 있다. 100[mTorr]의 압력에서는 740[ns]를 경과하여

Ar 플라즈마 상태에서 PLAD법에 의한 탄소 입자의 운송 모델링

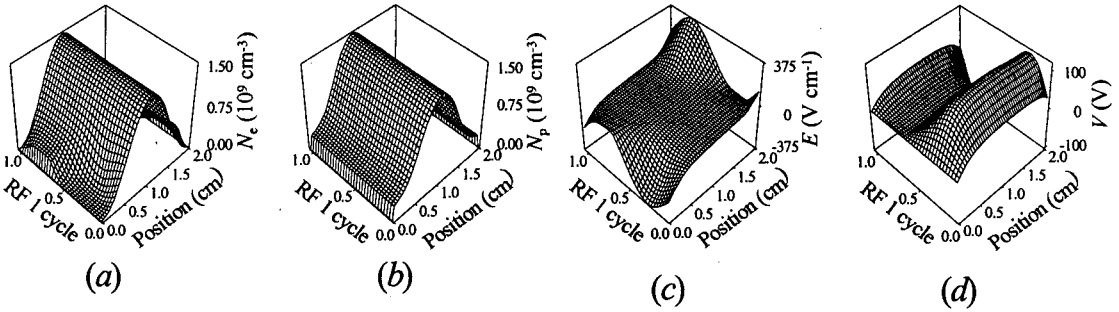


그림 3. Ar 플라즈마의 주기적 정상상태: (a) 전자 N_e , (b) 양이온 N_p , (c) 공간 전하 전계 E 그리고 (d) 전위 V
 Fig. 3. The spatio-temporal distributions of (a) the electron N_e , (b) the positive ion N_p , (c) the electric field E and (d) potential V in Ar plasmas of a periodic steady state

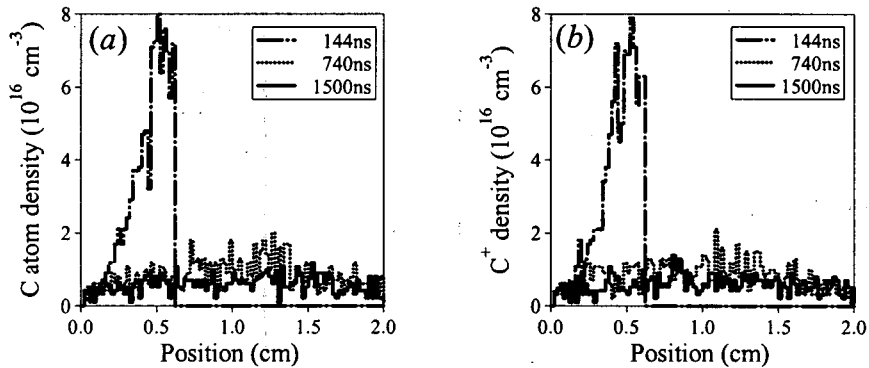


그림 4. Ar 가스 분위기 중에서의 시간 변화에 따른 (a) C 원자 및 (b) C⁺의 공간 분포
 Fig. 4. The spatial distribution of (a) C atom and (b) C⁺ with time in Ar gas atmosphere at 100(mTorr)

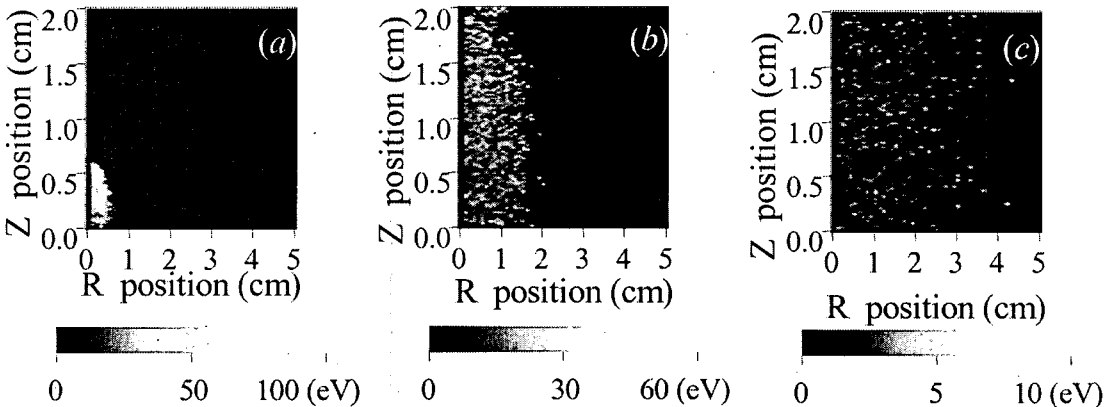


그림 5. 시간 변화에 따른 C 원자의 에너지 공간 분포: (a) 144(ns), (b) 740(ns) 그리고 (c) 3(μs)
 Fig. 5. The spatial distribution of C atom energies on (a) 144(ns), (b) 740(ns) and (c) 3(μs)

상부전극에 C 입자들이 도달하는 것을 알 수 있다.

그림 5는 3[μ s]까지의 시간 경과에 따른 방전 공간 내에서 형성되는 C 원자의 에너지 분포를 보여주고 있다. 그림 2의 전극 중앙($r=0.0$ [cm])점을 중심축으로 하여 오른쪽 단면을 보여주고 있다. Ar 원자와의 충돌 과정으로부터 대부분의 에너지를 잃게 되고, 상부 전극면($z=2.0$ [cm])에서는 10([eV]) 이하의 낮은 에너지를 가진 입자들이 입사하는 것을 볼 수 있다. Ar 가스 압이 낮을수록 충돌 확률도 감소하는 것으로부터, 낮은 가스압에서는 보다 높은 에너지를 가진 입자들이 기판에 입사하여 증착되는 것을 알 수 있다.

3.3 Ar 플라즈마 중에서의 입자 운동

본 모델에서는 3.2절의 결과와 비교하기 위해서, 위에 설명한 것과 같은 조건으로 설정하여 계산하였다. 그림 6은 Ar 플라즈마 중에서 레이저 조사후의 Graphite에서 방출된 C 원자 및 C⁺의 시간 변화에 따른 공간적 분포를 보여 주고 있다. C 입자의 시·공간적 운동은 그림 4와 동일한 분포를 하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 탄소 원자는 방전 공간에 형성되는 공간 전계 (E)에 의존하지 않고 움직이는 것으로 해석할 수 있으며, 표 1의 E4의 전리 프로세스는 C의 밀도에 비해서 Ar 플라즈마 중의 전자 밀도 (1.5×10^9 [cm⁻³])는 매우 낮으므로 C 밀도의 변화에

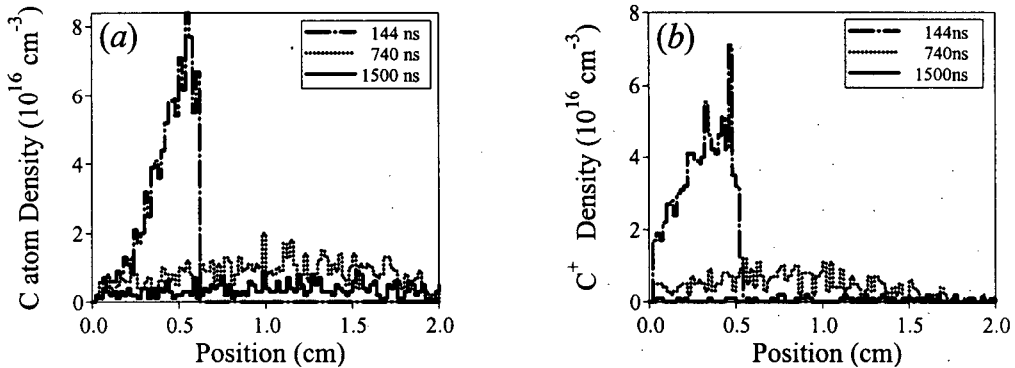


그림 6. Ar 플라즈마 중에서의 시간 변화에 따른 (a) C 원자 및 (b) C⁺의 공간 분포
Fig. 6. The spatial distribution of (a) C atom and (b) C⁺ with time in Ar plasma at 100(mTorr)

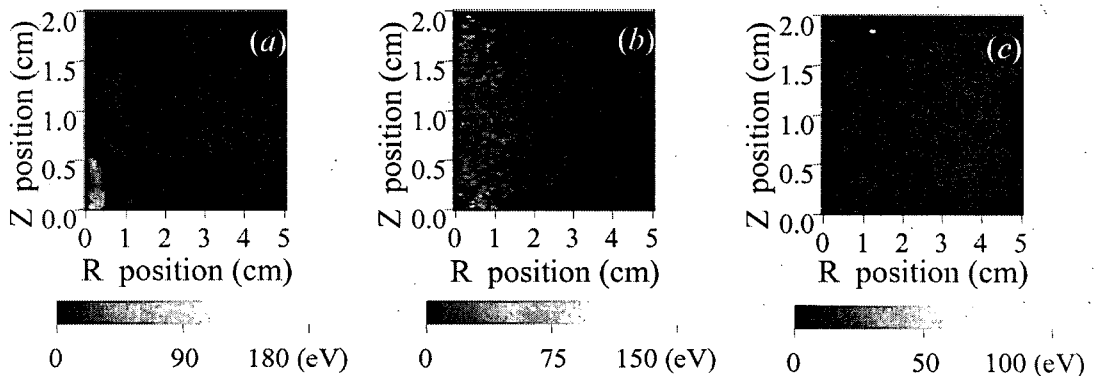


그림 7. 시간 변화에 따른 C⁺의 에너지 공간 분포: (a) 144(ns), (b) 740(ns) 그리고 (c) 3[μ s]
Fig. 7. The spatial distribution of C⁺ energies on (a) 144(ns), (b) 740(ns) and (c) 3[μ s]

Ar 플라즈마 상태에서 PLAD법에 의한 탄소 입자의 운동 모델링

큰 영향을 끼치지 않은 것을 알 수 있다. 그러나 C⁺의 입자 운동은 하부 전극 ($z=0.0[\text{cm}]$) 주변에서 C 원자에 비해 많은 수의 입자가 존재하는 것을 볼 수가 있다. 이것은 3.1절에서 설명한 바와 같이, 높은 공간 전하 전계 및 전위가 양 전극면에서 형성되어 있으므로 탄소 이온은 이러한 높은 전위 벽을 넘지 못하고 하부 전극으로 회향하여 전극 면에 모이게 된다. 그러나 주기적으로 변하는 RF 전위의 상대적으로 낮게 형성되는 위상에서 이온은 이러한 전위 벽을 넘어서 상부 전극으로 가속되는 것을 알 수 있다.

그림 7은 3[μs] 동안에 방전 공간내에서 형성되는 C⁺의 에너지 분포를 보여주고 있다. 그림 5에서와 같이, 그림 2의 전극 중앙($r=0.0[\text{cm}]$) 점을 중심축으로 하는 오른쪽 단면을 보여주고 있다. C 원자의 에너지 분포는 그림 5와 유사하므로 여기서는 생략하였다. C 원자는 충돌 과정을 거치지 않는 입자들이 상부 전극면을 향하여 전진하게 되므로 높은 에너지 분포가 선두에 위치하게 되지만, C⁺은 쉬스 내의 높은 전위(그림 3의 (d); 100[V])에 속박되어 하부 전극면($z=0.0[\text{cm}]$)으로 다시 회향한다. 회향된 입자들은 역으로 쉬스내의 전계에 의해 가속되는 것으로부터 그림 7 (a)와 같이 접지 전극면에서 보다 높은 에너지(180[eV])를 형성하는 것을 볼 수 있다. 한편, 상부 전극면($z=2.0[\text{cm}]$)에 가까울수록 기판 주위에 형성된 쉬스의 영향으로 기판을 향하여 가속됨으로써 C 원자에 비해 높은 에너지가 분포하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 레이저 용삭 증착법 (PLAD)을 이용하여 Graphite에서 방출된 전자 및 탄소 입자들이 Ar 플라즈마 중에서 어떠한 과정으로 운동 및 진전하는가를 1차원 하이브리드 모델을 통하여 시뮬레이션하였다. Ar 플라즈마는 유체 모델을 통하여 해석하였으며, 입자 모델로부터 탄소 입자들의 움직임을 시뮬레이트하였다. Graphite에서 방출된 입자들은 전자, 탄소 원자(C) 및 이온(C⁺)의 세 종류를 고려하였다.

Ar 가스 분위기 중에서는, C 및 C⁺의 운동은 거의

동일하게 형성되는 것을 알 수 있었다. Ar 원자와의 충돌 과정으로부터 대부분의 에너지를 잃게 되고, 상부 전극면($z=2.0[\text{cm}]$)에서는 10[eV] 이하의 낮은 에너지를 가진 입자들이 입사하는 것을 볼 수 있다. Ar 가스압이 낮을수록 충돌 확률도 감소하는 것으로부터, 낮은 가스압에서는 보다 높은 에너지를 가진 입자들이 기판에 입사하여 증착되는 것을 알 수 있었다.

Ar 플라즈마 중에서는 C는 공간 전하 전계에 의존하지 않고 운동하는 것으로부터 Ar 분위기 중의 운동과 거의 동일하게 시·공간적으로 형성되는 것을 볼 수 있었다. 그러나 C⁺는 하부 전극 주변에 형성된 높은 전계 및 전위에 의해서 상부 전극으로 이동하지 못하고 회향하여 하부 전극면에서 전하를 잃게 되는 것을 알 수 있었다. 그러나 전위 벽을 넘어서 상부 전극(기판)에 도달하는 이온 입자들은 플라즈마의 영향으로 인하여 100[eV] 정도의 높은 에너지를 가지고 기판에 입사하는 것을 알 수 있었다.

따라서 쉬스 내에 형성되는 전위를 제어함으로써 기판에 도달하는 C⁺의 밀도 및 에너지를 제어할 수 있는 것으로 기대되어진다.

그러나 본 모델에서 고려된 충돌 프로세스는 제한적이며, 탄소 클러스터 C_m($m=10\sim 60$) 또한 중요한 역할을 하는 것으로부터, 차후의 연구과제로 고려 및 선행되어야 할 필요가 있겠다.

References

- [1] Byeong-Yoon Lee, Ki-Dong Song, Jin-Kyo Chong and Kyong-Yop Park, "Steady State Analysis of Nozzle Ablation Under High Temperature and High Pressure Arc Plasma", Trans. KIEE, Vol. 52C, No. 9, pp. 395~399, 2003.
- [2] Dong-Hee Rhie, "Effects of Two-Step Annealing Process on the Pulsed Laser Ablated Lead Zirconate Titanate Thin Films", KIEE International Trans. on EA, Vol. 3-C, No. 2, pp. 43~47, 2003.
- [3] Suda Y, Nishimura T, Ono T, Akazawa M, Sakai Y and Homma N, "Deposition of fine carbon particles using pulsed ArF laser ablation assisted by inductively coupled plasma", Thin Solid Films, Vol. 374, pp. 287~290, 2000.
- [4] Suda Y, Suganuma Y, Sakai Y, Suzuki K, Tsujino J and Homma N, "Preparation of double layer film of boron and carbon by pulsed laser deposition", Appl. Surface Sci., Vol. 197-198, pp. 603~606, 2002.

- [5] D.B. Chrisey and G.K. Hubler, "Pulsed Laser Deposition of thin film", Wiley-Interscience, 1994.
- [6] F. Kokai and Y. Koga, "Time-of-flight mass spectrometric studies on the plume dynamics of laser ablation of graphite", Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B, Vol. 121, pp. 387~391, 1997.
- [7] Frederik Claeysens, Robert J. Lade, Keith N. Rosser and Michael N.R. Ashfold, "Investigations of the plume accompanying pulsed ultraviolet laser ablation of graphite in vacuum", J. Appl. Phys., Vol. 89, No. 1, pp. 697~709, 2001.
- [8] A.A. Voevodin and M.S. Donley, "Preparation of amorphous diamond-like carbon by pulsed laser deposition: a critical review", Surface and Coatings Technology, Vol. 82, pp. 199~213, 1996.
- [9] Y Sakai, S Sawada and H Tagashira, "Effect of Penning ionisation on an electron swarm in Ar/Ne mixtures: Boltzmann equation analysis", J. Phys. D., Vol. 19, No. 9, pp. 1741~1750, 1986.
- [10] Dougals H. Lowndes, Vladimir I. merkulov, A. A. Puzetzky, D. B. Gehegan, G. E. Jellison, Jr., C. M. Rouleau and T. Thundat, "Amorphous Diamond Films Deposited by Pulsed-laser Ablation: The Optimum Carbon-ion Kinetic Energy and Effects of Laser Wavelength", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 526, pp. 325~330, 1998.
- [11] Seung Min Park, Heebyung Chae, Sangwook Wee and Inhyung Lee, "Anomalous enrichment of C₂⁺ ions by laser ablation of graphite in Ar jet", J. Chem. Phys., Vol. 109, No. 3, pp. 928~931, 1998.
- [12] D. H. Lowndes, V. I. Merkulov, A. A. Puzetzky, D. B. Gehegan, G. E. Jellison, Jr., C. M. Rouleau and T. Thundat, "Amorphous Diamond Films Deposited by Pulsed-Laser Ablation: The Optimum Carbon-Ion Kinetic Energy and Effects of Laser Wavelength", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 526, pp. 325~330, 1998.
- [13] S. Amoroso, R. Bruzzese, N. Spinelli and R. Velotta, "Characterization of laser-ablation plasmas", J. Phys. B: AT. Mol. Opt. Phys., Vol. 32, pp. R131~172, 1999.

◇ 저자소개 ◇

소순열 (蘇淳烈)

1970년 10월 8일생. 1996년 2월 전남대학교 전남대학교 전기공학과 졸업. 1998년 2월 동대학원 석사학위 수여. 1999년 4월 호가이도대학교 공학연구과 전자정보공학전공 박사과정 입학. 2003년 3월 동 대학원 박사학위 취득. 현재 동 대학원 연구원.

임장섭 (林漳燮)

1967년 1월 19일생. 1989년 2월 전남대학교 전기공학과 졸업. 1991년 2월 동 대학원 석사학위 수여. 1996년 2월 동 대학원 박사학위 수여. 1996년 8월 현재 목포해양대학교 해양전자통신공학부 부교수.