

좁은 간격 CCP 전원의 전극과 측면 벽 사이 플라즈마 분포

최명선 · 장윤창[†] · 이석환 · 김곤호

[†]서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부

Investigation of Spatial Distribution of Plasma Density between the Electrode and Lateral Wall of Narrow-gap CCP Source

Myung-Sun Choi, Yunchang Jang[†], Seok-Hwan Lee and Gon-Ho Kim

[†]Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University

Abstract

The plasma density distribution in between the electrode and lateral wall of a narrow gap CCP was investigated. The plasma density distribution was obtained using single Langmuir probe, having two peaks of density distribution at the center of electrode and at the peripheral area of electrodes. The plasma density distribution was compared with the RF fluctuation of plasma potential taken from capacitive probe. Ionization reactions obtained from numerical analysis using CFD-ACE⁺ fluid model based code. The peaks in two region for plasma density and voltage fluctuation have similar spatial distribution according to input power. It was found that plasma density distribution between the electrode and the lateral wall is closely related with the local ionization.

Key Words : Capacitively coupled plasma, diffusion region, plasma density distribution, Capacitive probe, CFD-ACE⁺

1. 서 론

현재 반도체 식각공정에 폭넓게 사용되고 있는 용량성 결합 플라즈마(CCP) 장치는 고밀도 플라즈마 발생 및 공정 균일도 제어를 위하여 전극 간격이 좁고 공정 부산물의 원활한 배기를 위하여 전극 주변부에 상대적으로 넓은 배기 포트가 존재한다[1]. 그러므로 전형적인 공정용 CCP는 좁은 간격을 가지는 전극 영역과 전극 경계로부터 측면 벽, 배기 포트까지의 주변부 공간으로 구성된다. 기존의 CCP 해석에서 플라즈마는 두 전극 사이의 전기장에 의하여 생성되고 확산에 의하여 전극 주변부 공간까지 분포하게 된다. 이에 따라 전극 사이 공간과 전극 주변부 공간을 각각 ‘방전 영역’과 ‘확산 영역’으로 구분하였다[2].

방전 영역에서 플라즈마는 전자의 통계적 가열(stochastic heating) 및 옴식 가열(ohmic heating)에 의하여 생성된다. 고주파 전력이 인가된 경우, 플라즈마

분포는 정상과 효과와 표피효과에 의하여 공간에 따라 불균일한 전자가열로 결정된다[3, 4]. 반면에 확산 영역에서의 플라즈마의 분포는 방전 영역에서 생성된 플라즈마가 확산에 의해 결정되므로 전극 경계에서부터 방전영역에서 반경 방향으로 멀어질수록 플라즈마 밀도가 감소하는 분포를 갖게 된다. 그러나 기존의 연구 [5, 6]에서 이러한 해석방법으로 설명되지 않는 실험결과가 관측되었다. Sawada 등의 연구에 따르면[6], 넓은 확산 영역을 갖는 CCP장치에서 확산 영역의 플라즈마 밀도는 전극 경계에서의 플라즈마 밀도보다 같거나 더 높게 형성되었다. 또한 Zhang 등의 결과에 따르면,[7] 상부와 하부 전극에 동일한 전압을 같은 위상으로 인가하여 두 전극 사이의 전압보다 전극과 벽면 사이의 전압이 크게 인가되는 경우, 확산영역에서의 전자가열에 의하여 방전영역보다 더 높은 플라즈마 밀도 분포가 나타날 수 있음이 전산모사 결과에서 관찰되었다.

본 연구에서는 Sawada 등의 연구에서와 같이 좁은 전극 간격과 넓은 확산영역을 갖는 CCP장치에서 나타나는 확산영역에서의 플라즈마 밀도가 방전 영역 경계

[†]E-mail : js1wofl@snu.ac.kr

보다 높게 관찰되는 현상을 관찰하였으며, 확산영역에서의 전자가열 및 플라즈마 생성 특성을 실험과 전산모사를 통하여 분석하였다. 특히 아르곤 준안정성종(argon metastable)의 step ionization 반응을 통하여 상대적으로 낮은 전력이 전달될 것으로 예상되는 확산영역에서의 플라즈마 생성이 활성화 될 수 있음을 규명하고자 하였다.

2. 실험 장치

Fig. 1은 CCP 장치의 개략도이다. 진공챔버의 반경(R_w)은 0.29 m로 전력이 인가되는 상부전극과 축전기에 연결된 하부전극, 그리고 접지된 금속 벽으로 이루어져 있다. 상부전극의 반경(R_c)은 0.2 m, 하부에 위치한 부유된 전극인 electrostatic chuck (ESC)의 반경은 0.15 m로 두 전극은 0.02 m의 간격(l)으로 떨어져 있다. 상부전극과 배기포트 사이의 거리(l_{EB})는 0.85 m이다. 본 논문에서 ‘방전영역’과 ‘확산영역’은 각각 반경 $0 < r < 0.2$ m 범위의 영역(Fig. 1의 둥근 점선으로 표시된 부분)과 반경 $0.2 \text{ m} < r < 0.29$ m 범위의 영역(Fig. 1의 점선-파선으로 표시된 부분)으로 정의하였다.

실험은 아르곤 20 mTorr압력 조건에서 수행하였다. 아르곤 기체는 500 sccm의 유동률로 실리콘 샤워헤드를 통해 챔버에 주입되었으며, 상부 전극에는 RF 정합 회로를 통하여 100 MHz 전력을 200 W에서 800 W까지 인가하였다. 플라즈마 밀도 분포는 랑뮤어 프로브(Langmuir probe)로 측정을 하였다. 프로브 팁은 직경 0.1 ϕ , 길이 2 mm의 원통형이고, 텅스텐으로 이루어졌다. 프로브의 측정 위치는 상부 전극에서 5 mm 떨어진 위치에서 반경 방향으로 0 mm에서 280 mm까지 측정을 하였다.

RF 플라즈마 전위의 요동 크기(\tilde{V})는 용량성 탐침(capacitive probe)를 통해 측정하였다. 전기용량성 탐침은 1 pF과 22 pF의 용량성 분기기(capacitive divider)

를 통하여 탐침과 플라즈마의 용량성 결합(capacitive coupling)으로부터 \tilde{V} 를 측정하였다.

3. 전산모사 셋업

유체역학 기반의 CFD-ACE⁺ 상용 코드(2013년 버전[8])를 이용하여 전산모사를 통해 방전 챔버 내 이온화 반응율 크기의 분포를 조사하였다. 전산모사에서 사용된 방전공간의 구조는 Fig. 1과 과 같이 실제 장치를 단순화하였다. 전극 중심부로부터 축대칭을 가정하여 2D 구조를 모사하였고, 방전 가스의 유입은 상부 전극 전체에서 균일하게 이루어진다고 가정하였다.

CFD-ACE⁺ 코드의 ‘Flow’, ‘Chemistry/Mixing’, ‘Plasma’, ‘Electric’, ‘Magnetic’ 모듈을 사용하여 전산모사를 수행하였다. ‘Flow’ 모듈은 중성기체의 유체역학적 거동을 모사하며, ‘Chemistry/Mixing’ 모듈은 공간과 챔버 표면에서의 화학반응을 계산한다. 본 전산모사에 포함된 아르곤 기체의 반응들은 표 1과 같다. ‘Plasma’ 모듈은 다른 모듈들과 결합하여 플라즈마가 형성된 조건에서의 물리 법칙들을 적용하여 전산모사를 수행한다. ‘Electric’ 모듈은 ‘Plasma’ 모듈과 결합하여 전자의 저항 가열 및 통계적 가열과 이온 가열 등 플라즈마 가열 특성을 분석하기 위한 모듈이며, ‘Magnetic’ 모듈은 본 실험에서 사용된 100 MHz전원에 의한 전자기적 효과를 반영하기 위한 모듈이다.

챔버 벽과 전극은 완전한 도체로 가정하여 전자기파가 투과할 수 없다고 가정하였다. 운전 압력은 순수한 아르곤 기체에 대해 20 mTorr로 설정하였다. 상부 전극에 인가된 전력은 100 MHz 주파수로 100 W로 설정하였고, 이 때 전압의 진폭은 100 V였다.

4. 실험 결과 및 해석

Fig. 2는 20 mTorr Ar 환경에서 100 MHz 전원을 상

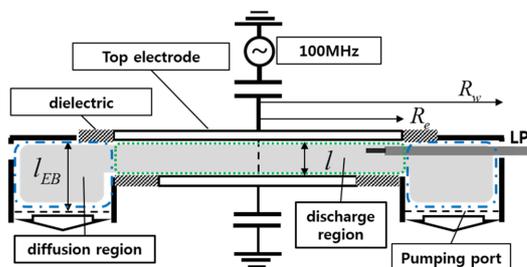


Fig. 1. Schematic diagram of CCP source.

Table 1. The reactions for Ar discharge included in this simulation

Reaction	Explanation	Region
$\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar}^+ + 2e$	Ionization	Volume
$\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar}_m + e$	Excitation	Volume
$\text{Ar}_m + e \rightarrow \text{Ar}^+ + 2e$	Stepwise ionization	Volume
$\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar} + e$	Elastic collision	Volume
$\text{Ar}^+ \rightarrow \text{Ar}$	Recombination	Surface
$\text{Ar}_m \rightarrow \text{Ar}$	Energy loss	Surface

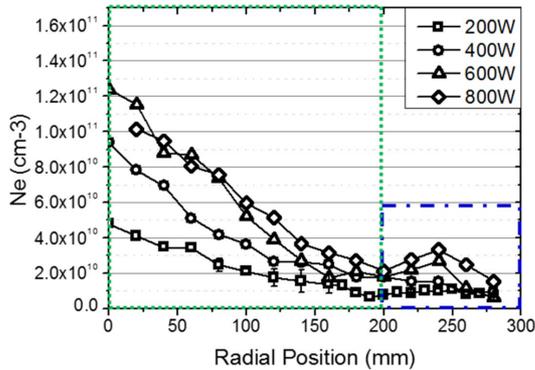


Fig. 2. Plot for plasma density distribution for various operating power at $P_{Ar} = 20$ mTorr.

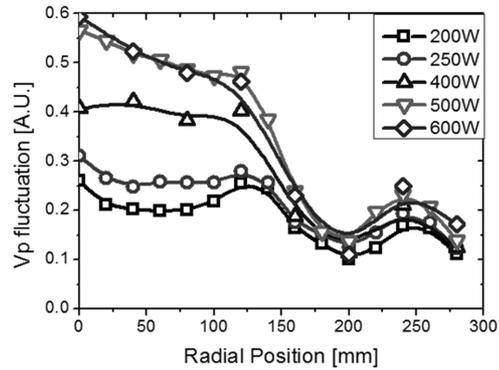


Fig. 4. Plots of plasma potential fluctuation measured by capacitive probe with oscilloscope for various 100 MHz top electrode power, operated at $p_{Ar} = 20$ mTorr.

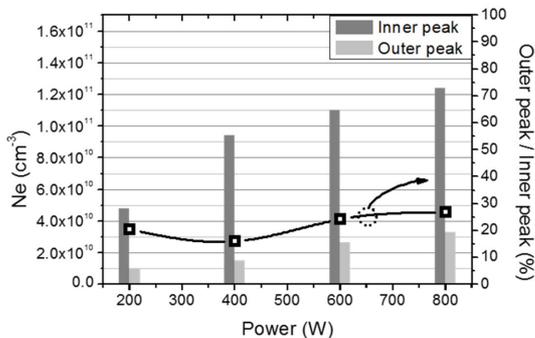


Fig. 3. Histogram for peaks in discharge region (grey bar) and diffusion region (light grey bar) at 20 mTorr argon discharge and their ratio (black point).

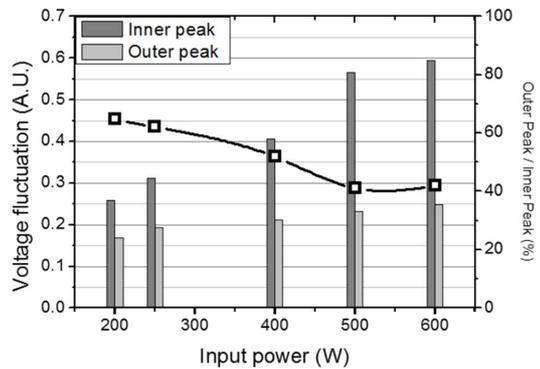


Fig. 5. Histogram for voltage fluctuation peaks in discharge region (grey bar) and diffusion region (light grey bar) at 20 mTorr argon discharge and their ratio (black point)

부 전극에 인가했을 때 플라즈마 밀도의 분포를 인가 전력에 따라 나타낸 것이다. 방전 영역에서 플라즈마 밀도 분포는 중앙에서 최대값을 갖고 중앙에서 멀어질수록 감소하는 경향이 나타났다. 방전 영역과 확산 영역의 경계인 반경 0.2 m에서 플라즈마 밀도 분포는 골을 갖고, 이후 플라즈마 밀도는 반경 0.24 m까지 다시 증가하였다가 감소하는 경향을 보였다. 0.2 m 이후 영역은 전극과 벽 사이의 공간에 해당한다.

방전 영역과 확산 영역 각각에 피크가 형성되는 분포 경향은 인가 전력의 크기에 상관없이 관찰되었고, 각 밀도 피크의 크기는 전력이 증가함에 따라 증가하였다. Fig. 3는 인가전력에 따른 두 영역의 피크의 크기와 그 비율이다.

인가 전력이 200 W에서 400 W로 증가할 때, 방전 영역의 밀도가 상대적으로 크게 증가하였다. 또한 인가 전력이 400 W에서 800 W까지 증가할 때, 확산 영역의 밀도 증가가 상대적으로 커짐에 따라 방전 영역의 피크(inner peak)에 대한 확산 영역 피크(outer peak)의

비는 400 W에서 최솟값을 가지고 다시 증가하는 경향을 보였다. 확산에 의한 플라즈마 밀도 분포는 전극 경계에서 멀어질수록 감소할 것이므로, 확산 영역에서 형성된 밀도의 피크는 이 영역에서 플라즈마 밀도가 단순히 확산 현상만으로 설명되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 4는 각 인가전력에 따른 플라즈마 전위의 RF진폭(\tilde{V})의 분포이다. 챔버의 측면 벽은 접지되어 있으므로 확산영역에서는 \tilde{V} 에 비례하여 플라즈마와 챔버 벽면 사이에 형성된 전자기장의 섭동이 만드는 통계적 가열이 일어날 수 있다. 따라서 \tilde{V} 분포로부터 확산영역에서 전달된 전력의 크기를 유추할 수 있다. 플라즈마 밀도 분포 (Fig. 2)와 같이 방전영역과 확산 영역에서 피크와 두 영역의 경계지점에서의 골이 관찰되었다.

Fig. 5는 \tilde{V} 에서 관찰된 방전영역과 확산영역의 두 피크의 크기와 그 비율이다. 방전영역과 확산영역의

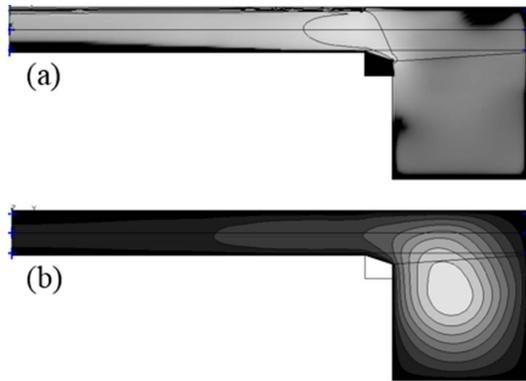


Fig. 6. Plot of power deposition (a) and electron density distribution (b). The maximum values are $1.4E5 \text{ W/m}^3$ for (a) and $4.7E16 \text{ m}^{-3}$ for (b). The minimum values are 0 for (a) and $1.8E12 \text{ m}^{-3}$ for (b).

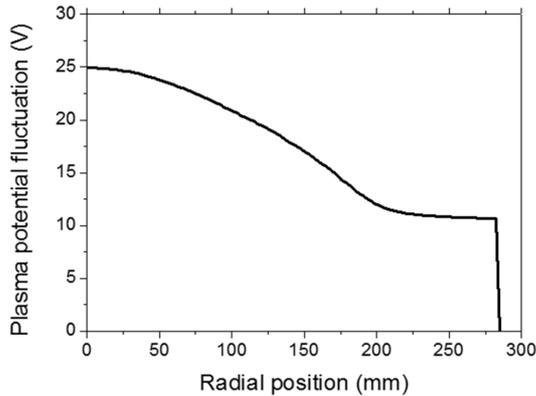


Fig. 7. Plots of distribution for plasma potential fluctuation calculated by simulation.

\tilde{V} 피크는 인가전력의 증가에 따라 모두 증가하였다. 확산영역의 피크는 상대적으로 낮은 증가율로 일정하게 증가하였으나, 방전영역의 피크는 인가전력이 400 W에서 500 W로 증가할 때 급격한 증가가 관찰되었다. 결과적으로 방전영역의 피크에 대한 확산영역의 피크의 비는 200 W에서 대략 65 %에서 500 W에서 약 40%로 감소하였다. 따라서 밀도와 \tilde{V} 에 대해서 확산 영역에 대한 방전 영역 각 피크의 비율은 인가 전력에 대해 유사한 경향으로 변화하였다

Fig. 6 (a)는 전산모사를 통하여 해석된 전달전력의 분포이다. RF전압이 인가된 상부 전극 근처에서의 통계적가열에 의한 전달전력은 약 10^5 W/m^3 이고, 두 전극 사이의 공간에서 저항가열에 의한 전달전력은 약 $10^3 \sim 10^4 \text{ W/m}^3$ 이었다. 반면에 확산영역에서 전달된 전력은 약 $10^2 \sim 10^3 \text{ W/m}^3$ 으로 방전영역에서의 전달

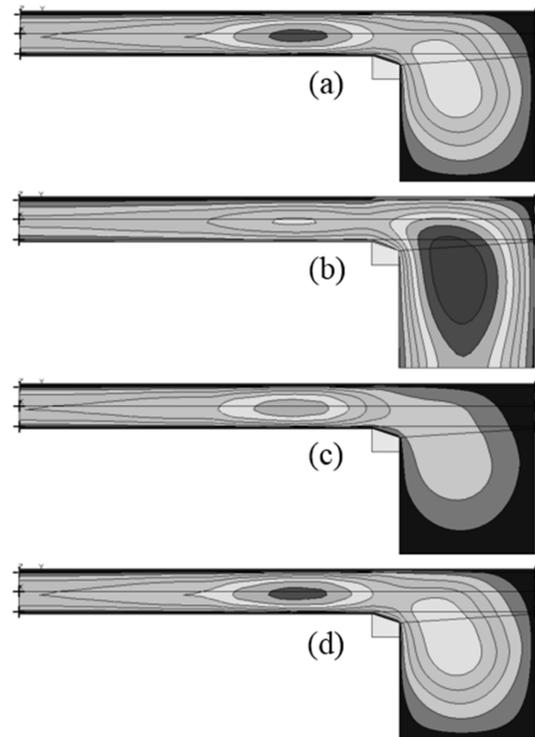


Fig. 8. Plots of reaction rate for argon excitation (a), distribution of metastable (b), reaction rate for ground state argon ionization (c), and stepwise ionization (d).

전력의 10 % 정도이다. Fig. 6 (b)는 전산모사를 통하여 해석된 플라즈마 밀도 분포이다. 10 % 정도의 낮은 전달전력에도 불구하고 확산영역의 플라즈마 밀도는 방전영역보다 높게 나타났으며, Fig. 2의 실험결과와 같이 확산영역에서 플라즈마 밀도 피크가 관찰되었다.

Fig. 7은 \tilde{V} 의 분포를 전산모사를 통해 해석한 결과이다. 방전영역의 \tilde{V} 는 전극중심부에서 약 25 V정도로 나타났으며 중심부에서 멀어질수록 감소하는 경향을 보였다. 확산 영역에서 \tilde{V} 는 약 10 V로 일정하게 분포하였다.

Fig. 8는 3가지 공간 반응에 대한 반응률 분포와 아르곤 준안정성종(Ar_m)의 분포를 나타낸 것이다. 아르곤 준안정성종 여기반응($\text{Ar} + e \rightarrow \text{Ar}_m + e$)의 반응률(Fig. 8(a))은 바닥상태의 아르곤(Ar)과 전자의 충돌에 의하여 나타나기 때문에 Fig. 5(a)의 전달전력 분포와 유사한 분포가 관찰되었다. 아르곤 준안정성종 여기반응의 분포는 전달전력 분포와 유사하게 전극 가장자리에서 가장 크게 나타나지만 확산영역의 상대적으로 낮은 손실면적으로 인하여 Fig. 8(b)의 아르곤 준안정성

중(Ar_m) 밀도분포는 확산영역에서 최대값을 갖는 것으로 관찰되었다. 이 결과는 T. Ohba 등이 아벨 반전법 (Abel inversion method)으로 측정한 Ar_m 의 분포와 유사한 경향을 나타냈다. 이 실험 결과에 따르면, [9] 상대적으로 긴 수명을 갖는 Ar_m 의 분포가 확산영역에서 피크를 갖는다는 것이 관찰되었다.

Fig. 8(c)는 바닥상태 아르곤과 전자의 충돌에 의한 이온화 반응($Ar + e \rightarrow Ar^+ + 2e$)의 분포이다. 아르곤 원자의 이온화 반응은 Fig. 8(a)의 여기반응과 같이 전자가열에 전달된 전력과 비례하므로 전극 가장자리 부근에서 주로 나타난다. 반면에 Fig. 8(d)의 아르곤 준안정성종에 의한 이온화반응($Ar_m + e \rightarrow Ar^+ + 2e$)은 확산영역에서 주로 나타났다. 이는 아르곤 준안정성종의 밀도가 확산영역에서 높게 나타나기 때문이다. 각 반응의 반응률의 최대값은 바닥상태의 아르곤(Fig. 8(c))과 준안정성종(Fig. 8(d))에 대하여 각각 $5 \text{ kmol/m}^3\text{sec}$ 와 $4 \text{ kmol/m}^3\text{sec}$ 로 유사하였다.

Fig. 8(b)에서 나타난 확산영역에서의 아르곤 준안정성종의 밀도는 바닥상태 아르곤 밀도의 0.16 %수준이다. 하지만 준안정성종 이온화 반응($Ar_m + e \rightarrow Ar^+ + 2e$)의 문턱에너지는 5.22 eV로 바닥상태 아르곤의 이온화 반응($Ar + e \rightarrow Ar^+ + 2e$)의 문턱에너지인 15.76 eV 보다 매우 낮아 확산영역의 이온화 반응률은 준안정성종 이온화반응에 의하여 방전영역의 이온화반응률과 비슷한 값을 갖게 된다.

그러므로 Fig 4의 \tilde{V} 에서 관찰한 바와 같이 확산 영역에서 플라즈마 전위의 RF진폭에 의한 상대적으로 낮은 전력 전달에 의해서도 준안정성종의 이온화 반응에 의해 확산영역의 이온화 반응률은 방전영역의 반응률과 비슷한 크기를 가질 수 있음을 예상할 수 있다. 이는 전극과 벽면 공간에서도 전자가열이 존재하고 있음을 보여주는 결과로 사료된다. 따라서 Fig. 2와 같이 확산 영역의 플라즈마 밀도 분포에서 방전 영역의 20~30 % 크기의 피크가 형성된다.

5. 결 론

좁은 전극 간격과 넓은 배기 공간을 가지는 공정용 CCP장치의 플라즈마 해석은 두 전극 사이에서만 플라즈마가 생성되는 것으로 해석되어 왔다. 본 연구에서는 확산영역에서 플라즈마 밀도가 높게 나타나는 현상을 설명하기 위하여 실험적으로 \tilde{V} 의 분포를 측정하고 전산모사를 통하여 이온화율 크기 분포를 조사하였다. 확산 영역에서도 플라즈마 생성이 가능한 크기의 \tilde{V} 가

인가되고 있음이 관찰되었다. CFD-ACE⁺ 를 이용한 전산모사로부터 전극 사이에서만 아니라 주변부 공간에서도 비슷한 이온화 반응률이 나타남이 해석되었다. 상대적으로 낮은 RF전위에도 불구하고 비슷한 이온화 반응률이 나타나는 이유는 Ar^* 로 인한 이온화 반응이 확산영역에서 활발히 일어나기 때문으로 나타났다. 따라서 확산 영역에서의 플라즈마 밀도는 단순히 방전영역의 플라즈마가 확산되어 분포하는 공간이 아닌 플라즈마 생성이 일어나는 공간으로 해석되어야 하며 이는 두 전극과 전극 사이의 공간만을 해석하는 기존의 CCP 해석 모델이 챔버와 확산영역을 포함하는 해석 모델로 수정되어야 함을 의미한다.

감사의 글

이 논문은 산업통상자원부 전자정보디바이스산업원 전기기술개발사업(반도체 공정장비) 및 BK21 플러스 사업에 의하여 일부 지원되었음(No.21A20130012821).

참고문헌

1. M.-S Choi, Y. Jang, S.-H Lee, G.-H Kim, *Journal of KSDT* vol.13 No.3, pp 39-43, 2014.
2. Z.-H. Bi, Z.-L. Dai, Y.-R. Zhang, D.-P. Liu, Y.-N. Wang, *Plasma Sources Sci. Technol.* 22 (2013) 055007 (8pp).
3. M. A. Lieberman, J. P. Booth, P. Chabert, J. M. Rax, M. M. Turner, *Plasma Sources Sci. Technol.* 11 (2002) 283-293.
4. A. Perret, P. Chabert, J.-P. Booth, J. Jolly, J. Guillon, and Ph. Auvaray, *Appl. Phys. Lett.* 83 (2003) 243.
5. V. Volynetz, A. Ushakov, D. Sung, Y. N. Tolmachev, V. G. Pashkovsky, J. B. Lee, T. Y. Kwon, K. S. Jeong, *J. Vac. Sci. Technol. A* 26, (2008) 406.
6. I. Sawada, P. L. G. Ventzek, B. Lane, T. Ohshita, R. R. Upadhyay, L. L. Raja, *J. J. Appl. Phys.* 53 (2014) 03DB01.
7. Y.-R. Zhang, X. Xu, A. Bogaerts, Y.-N. Wang, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 45 (2012) 015203 (13pp).
8. <https://www.esi-group.com/software-services/virtual-environment/cfd-multiphysics/ace-suite/cfd-ace>.
9. T. Ohba, T. Makabe, *Appl. Phys. Lett.* 96 (2010) 111501.

접수일: 2014년 10월 13일, 심사일: 2014년 10월 27일, 게재확정일: 2014년 11월 14일