

DBD(Dielectric Barrier Discharges)에서 진공 플라즈마 발생에 대한 해석적 연구

An Analysis of Vacuum Plasma Phenomena in DBD(Dielectric Barrier Discharges)

신명수¹, 차성훈¹, 김종봉^{2,✉}, 김종호³, 김성영⁴, 이혜진⁵
 Myoung-Soo Shin¹, Sung-Hoon Cha¹, Jong-Bong Kim^{2,✉}, Jong-Ho Kim³, Seong-Young Kim⁴
 and Hye-Jin Lee⁵

1 서울산업대학교 NID 융합기술대학원 (Graduate School of NID, Seoul National Univ. of Technology)

2 서울산업대학교 자동차공학과 (Department of Automotive Engineering, Seoul National Univ. of Technology)

3 서울산업대학교 금형설계학과 (Department of Die & Mould Design, Seoul National Univ. of Technology)

4 (주)어플라이드 플라즈마 (Applied Plasma Co.)

5 한국생산기술연구원 (Korea Institute of Industrial Technology)

✉ Corresponding author: jbkim@snut.ac.kr, Tel: 02-970-6434

Manuscript received: 2008.8.7 / Revised: 2008.10.25,11.25 / Accepted: 2008.11.25

DBD(Dielectric Barrier Discharges) plasma is often used to clean the surface of semiconductor. The cleaning performance is affected mainly by plasma density and duration time. In this study, the plasma density is predicted by coupled simulation of flow, chemistry mixing and reaction, plasma, and electric field. 13.56 MHz of RF source is used to generate plasma. The effect of dielectric thickness, gap distance, and flow velocity on plasma density is investigated. It is shown that the plasma density increases as the dielectric thickness decreases and the gap distance increases.

Key Words : DBD (Dielectric Barrier Discharges, 절연막방전), Plasma (플라즈마), Simulation (해석)

1. 서론

1900년대 말부터 플라즈마를 산업에 응용하기 시작하여 최근에는 표면 코팅, 반도체 식각, 표면 세정, 공기정화 등에 다양하게 적용하고 있다. 특히 반도체 제조 공정에 핵심 공정으로 많이 이용이 되고 있다. 반도체 제조 공정은 반도체 웨이퍼를 가공하여 반도체 소자를 생산하는 것을 의미한다. 반도체 웨이퍼의 가공 공정 중에서 식각은 핵심기술의 하나이다. 식각은 웨이퍼 상에 photoresist(PR)나 hard mask(HM)로 형성된 패턴에 따라 하부 막을 제거하는 작업이다. 반도체의 집적도가 증가함에 따라 오늘날 식각공정은 높은

Aspect Ratio(AR)과 미세한 회로선폭(CD:Critical Dimension)을 필요로 하므로 화학약품을 사용하는 습식 에칭에 비해 비등방성 에칭이 가능한 플라즈마를 이용한 건식 식각이 주로 사용되고 있다.^{1,2}

반도체 공정에서 플라즈마의 응용은 에칭 이외에도 표면세정에도 활발히 이용이 되고 있다.³⁻⁶ 후속 공정이 접합 공정인 경우 표면에 이물질이 있으면 접합성능이 현저하게 떨어진다. 그래서 접합 이전에 반드시 표면을 깨끗하게 세정해 주어야 한다. 표면이 세정된 정도는 액체의 접촉각을 측정함으로써 판단한다. 표면에서의 액체의 접촉각은 표면의 에너지와 관계가 있는데, 일반적으로 표면의 에너지가 클수록 액체의 접촉각이 작아지는 친

수성의 효과를 얻을 수 있다.⁷ 표면의 에너지는 플라즈마 발생 전압, 진행 속도, 압력, 가스의 종류 등에 영향을 받는다.

플라즈마 공정의 중요성이 대두됨에 따라 80년대부터 플라즈마에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔다. 플라즈마란 부분적으로 약 이온화 되어 있는 상태를 말하는데, 공정용 플라즈마는 반응로의 외부에서 전기장을 인가하여 발생하는데 외부 전기장의 흡수는 플라즈마 내부의 전자에 의해 흡수되며 이렇게 높은 에너지의 전자는 기체의 충돌하여 이온과 활성화 물질을 생성하게 된다. 이렇게 전기방전에 의해 발생된 플라즈마는 전기적으로는 준중성 상태에 있으며, 집단적인 운동특성을 지니고 있다. 플라즈마의 내부를 이루는 물질들은 분자와 원자, 라디칼, 이온, 전자로 이루어진다.⁸

Lee 등²은 두 개의 주파수를 첨가한 용량결합형 플라즈마를 이용하여 실리콘 산화물 식각과 ArF 포토레지스트의 변형에 대한 영향을 분석하였고, Jiang 등⁹은 용량결합형 플라즈마의 RF/직류전압을 변화하면서 열적 메커니즘과 미세입자의 흐름을 해석하였다. Hollander 와 Behnisch,⁶ 조중희 등,⁴ Yi 등¹⁰은 전압, 주입 가스의 종류, 거리 등의 플라즈마 발생 조건과 플라즈마 처리 시간에 따른 표면 친수화 정도를 측정하여 분석하였다. 김영수 등³은 유도 결합형 플라즈마를 이용하여 저밀도 폴리에틸렌의 플라즈마 이온주입 방법으로 처리된 폴리스티렌의 분자량에 따른 표면 친수성 및 에이징 현상에 대해 연구하였다. Han 등¹¹은 350℃의 유도결합형 플라즈마를 이용하여 나노결정의 높은 품질의 실리콘 필름제작에 대하여 연구하였다.

플라즈마에 대한 연구는 실험적 방법이 주를 이루고 있다. 플라즈마 해석은 유체 유동 해석뿐만 아니라, 전자기장 해석, 화학적 반응 해석, 그리고 전자 및 이온의 거동까지도 해석을 해야 하기 때문에 매우 복잡하다. 최근에 화학반응과 전자 및 이온에 대한 동역학 해석 이론이 제안되면서 플라즈마에 대한 해석도 접근이 되기 시작하였다.¹²⁻¹⁴

본 연구에서는 유전체의 두께, 유전체 사이의 거리, 가스의 속도에 따라서 플라즈마 밀도를 해석하였다. 작동 압력은 100Pa 이고, 200V 의 13.56MHz 의 전원을 적용하였다. 해석은 플라즈마 발생을 해석할 수 있는 CFD-ACE¹² 를 이용하였고, 유체유동, 화학 반응, 전자기장, 플라즈마 해석을 포함하였다.

2. CCP 플라즈마 해석 모델링

Fig. 1 은 해석에 이용된 CCP 플라즈마 발생기를 보여준다. 가운데 1 번이 전극이고, 양쪽의 4 번 부품이 유전체이다. 각각 구성 부품의 재료는 Table 1 에 기술하였다.

Table 1 Materials used for each part in Fig. 1

NO	Title	Material
1	Electrode	
2	Insulator(1)	Teflon
3	Insulator(2)	Teflon
4	Insulator	Ceramic
5	Right Side Wall	Aluminum 6061-T6
6	Top Cover	Aluminum 6061-T6
7	Left Side Wall	Aluminum 6061-T6

해석은 3 차원으로 하지 않고 2 차원으로 수행했다. Fig. 1(a) 는 조립된 형상이고, Fig. 1(b)는 분해된 형상이다. 그림에서 틈새가 좁고 상하 길이와 폭(그림에서 W)가 크기 때문에 5 번 부품 중앙과 7 번 부품 중앙을 연결하는 세로 단면으로 2 차원 해석 하여도 큰 무리가 없을 것으로 본다 2 차원 해석 단면은 Fig. 1 에 점선으로 표시되어 있다. 2 차원 해석한 단면의 형상과 경계조건은 Fig. 2 에 나타내었다. 전극과 유전체 사이는 0.5cm-2cm 로 하였고, 전극과 유전체의 길이는 12cm 로 하였다. 가스의 압력은 100Pa 이고, 전력 공급은 200V, 13.56MHz 로 우측 전극(Electrode)에 하였다. 가스는 1.0m/s 의 속도로 입구(Inlet)를 통해 공급되었고,

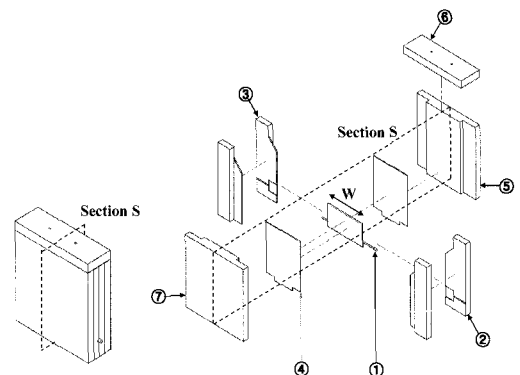


Fig. 1 Curtain type DBD in (a) assembled and (b) disassembled states

출구(Outlet)은 100Pa 의 압력으로 경계조건 처리하였다.

해석은 상용 S/W 인 CFD-ACE 를 이용하여 수행하였다. 가스는 유체로 모델링 하였고, 유전체(Dielectric)는 고체로 모델링 하였다.

유전체의 왼쪽 외곽면은 접지로 0V 로 고정하였다. 시간에 대한 적분은 RF 플라즈마 관련 적분과 유동 관련 적분으로 나누어서 한다. 플라즈마 해석은 1Hz 를 100 번 나누어 수행하였고, 유동은 10^{-5} s 간격으로 적분을 하였다. 한번의 시간 적분 동안 최대 축차 회수는 10 번으로 하였다. 시간에 의존적인 과도해석에서 시간적분 간격 조정은 해의 수렴성에 큰 영향을 준다. 위의 조건으로 해석을 수행할 경우 수렴이 잘 되었다.

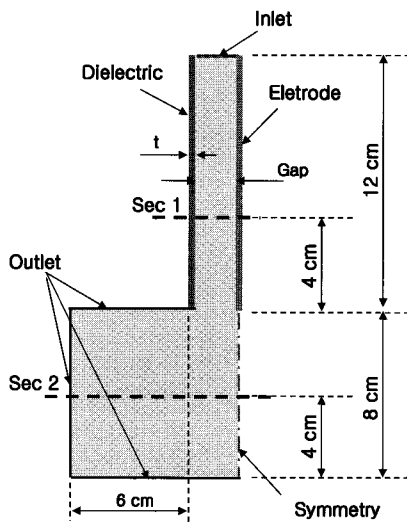


Fig. 2 Two dimensional analysis model and boundary conditions

3. 해석결과

해석은 전극과 유전체 간격은 0.5, 1.0, 1.5, 2.0cm 로 변화 시키고, 유전체의 두께는 0.1, 0.2, 0.5cm 로 변화 시키고, 가스의 유입 속도는 1, 5, 10, 15m/s 로 변경시키면서 수행하였고 결과를 분석하였다. 유체 유동 모듈, 화학반응 모듈, 플라즈마 모듈, 전기장 모듈을 연결하여 연성으로 해석하였다. 가스는 아르곤(Ar)을 이용하였다.

Fig. 3 은 전원 공급 12 초 후 플라즈마 밀도이다. 유전체간격 2cm, 두께 0.1cm, 전압 200V, 속도는 15m/s 인 경우다. 유전체와 전극사이의 시스

(Sheath)가 잘 보인다. Fig. 4 는 95 초 후 아르곤 플라즈마 밀도를 보여준다. 시스(Sheath)가 잘 관찰되고 플라즈마 밀도는 채널의 중간 부분에서 높게 나타나고 있다. 플라즈마가 채널 밖으로는 토출되는 것은 아직 크게 보이지는 않고 있지만 12 초보다 많은 양이 토출되고 있다.

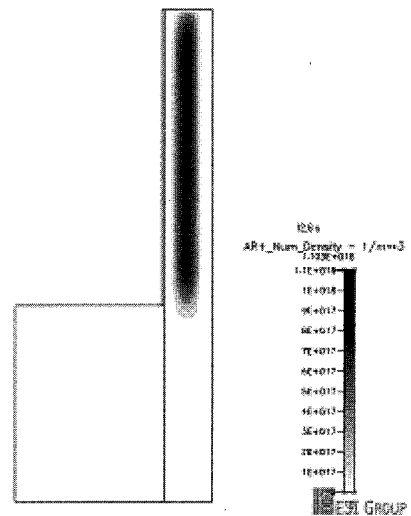


Fig. 3 Plasma(Ar⁺) density after 12 seconds

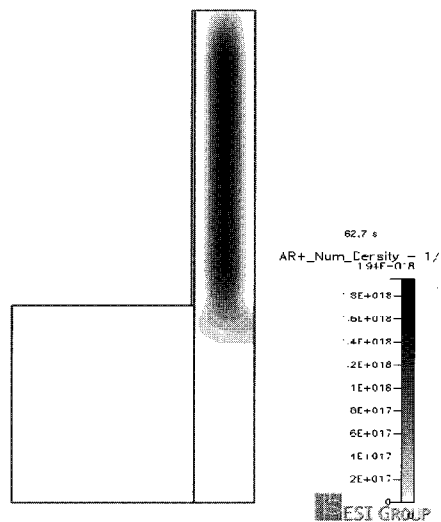


Fig. 4 Plasma(Ar⁺) density after 95 seconds

Fig. 5 는 시간이 경과함에 따른 단면 1(Fig. 2 에 Sec 1 로 표시)에서의 플라즈마 밀도의 변화를 보여준다. 시간이 지남에 따라 중앙부의 플라즈마 밀도가 점점 증가하고 있다. 계속해서 해석을 진

행하면 더 이상 플라즈마 밀도가 변하지 않고 유지되는 시각이 있을 것이다. 그 시각까지 해석을 수행하여 플라즈마 밀도를 비교하였다.

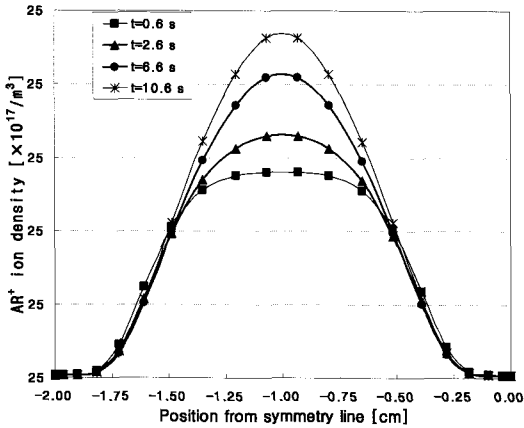


Fig. 5 Plasma density distribution along section 1 for various elapsed times

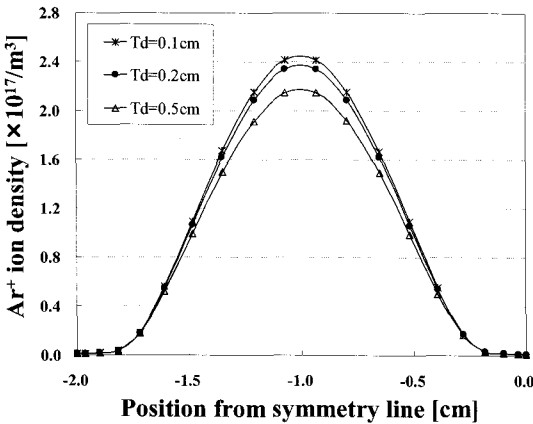


Fig. 6 Plasma(Ar+) density distribution for different dielectric thicknesses(section 1)

Fig. 6~9는 단면 1에서 유전체 두께, 전극과 유전체 사이의 거리, 입구에서 가스의 속도, 그리고 전압에 따른 플라즈마 밀도 분포를 각각 보여준다. 시간은 전압을 가한 후 12.6 초 후이다. 충분한 시간동안 해석하여야 하지만, 해석 시간이 너무 오래 소요되어 12.6 초의 결과로 상대적으로 비교하고자 한다. 전극과 유전체 부위의 시스발생 영역의 플라즈마 밀도는 유전체 두께에 크게 영향을 받지 않는다. 하지만, 중앙 부분은 유전체 두께가 작을수록 플라즈마 밀도가 커짐을 알 수 있다. 유

전체와 전극 사이의 거리는 클수록 플라즈마 밀도가 높음을 보인다. 이것은 시스의 발생영역은 변화가 없기 때문에 간격이 작아지면 플라즈마 발생 영역이 작아지기 때문으로 사료된다. 간격이 0.5cm인 경우 간격 전체가 시스 영역이 되어 밀도가 현저히 낮아진다.

Fig. 8 에서는 플라즈마 밀도가 가스의 유입 속도가 클수록 밀도가 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 가스의 속도가 빠를수록 전자와 충돌 확률이 커지기 때문으로 사료된다.

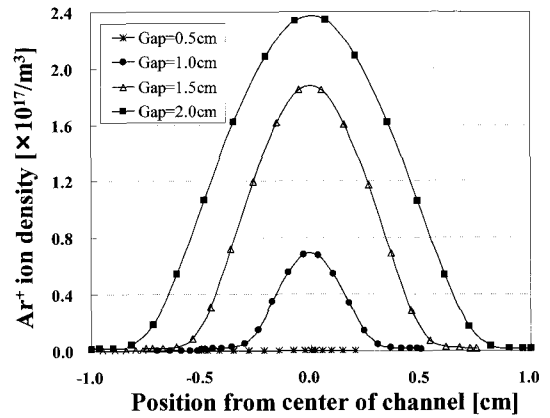


Fig. 7 Plasma(Ar+) density distribution for different gap distances(section 1)

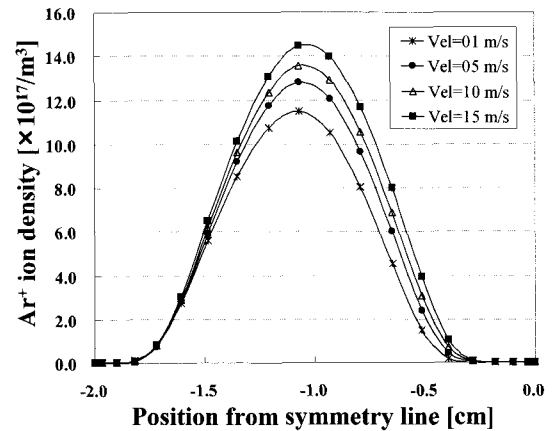


Fig. 8 Plasma(Ar+) density distribution for different inlet velocities(section 1)

Fig. 9 에서는 전압에 따른 플라즈마의 밀도변화를 알아보았는데 전압이 클수록 밀도가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것을 전압이 큰 경우에

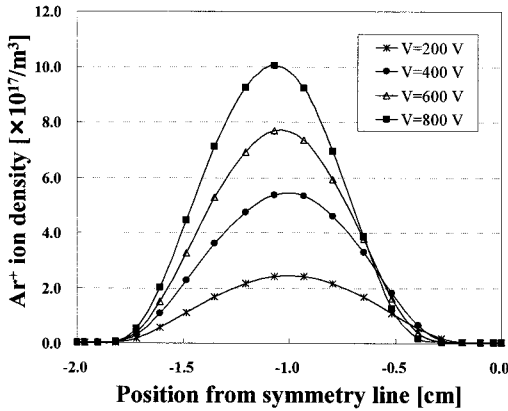


Fig. 9 Plasma(Ar⁺) density distribution for different RF voltages(section 1)

더 많은 에너지가 유입되기 때문이라고 사료된다.

Fig. 10~13 은 단면 2(Fig. 2 에 Sec 2 로 표시)에 서 유전체 두께, 전극과 유전체 사이의 거리, 가스 의 유입 속도, 그리고 전압에 따른 플라즈마 밀도 를 보여준다. 아직은 전극과 유전체 사이에서 발 생한 플라즈마가 충분히 토출되지 않아 플라즈마 밀도가 매우 작게 형성이 되었다.

Fig. 10 과 Fig. 11 는 유전체 두께가 얇을수록, 그리고 유전체와 전극 사이의 거리가 멀수록 발생 기 밖으로 토출되는 플라즈마 밀도가 큼을 알 수 있다. Fig. 8 에서와 마찬가지로 플라즈마 밀도가 속 도가 빠르면 빠를수록 큼을 알 수 있다. 또한 전 압에 따른 영향 역시 단면 1 에서처럼 전압이 클수 록 밀도가 큰 것을 알 수 있다. 향후 완전히 시간 에 대해 완전히 수립된 결과를 이용하여 다시 경 향을 분석할 필요는 있을 것으로 사료된다.

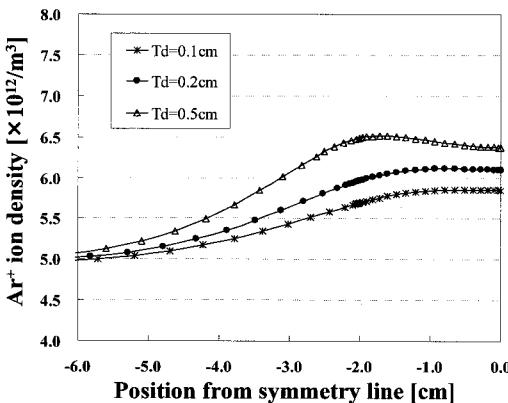


Fig. 10 Plasma(Ar⁺) density distribution for different dielectric thicknesses(section 2)

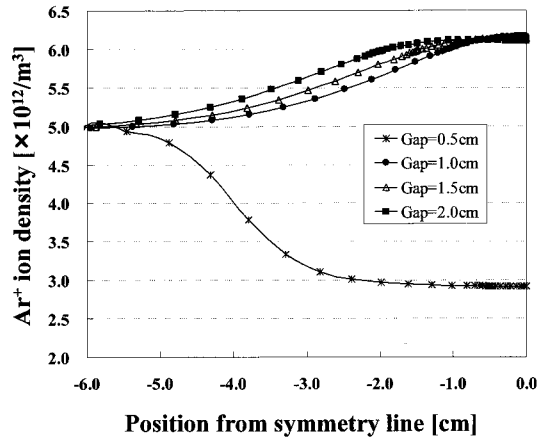


Fig. 11 Plasma(Ar⁺) density distribution for different gap distances (section 2)

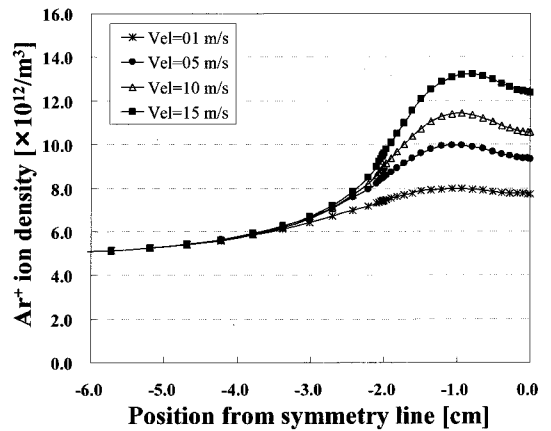


Fig. 12 Plasma(Ar⁺) density distribution for different inlet velocities(section 2)

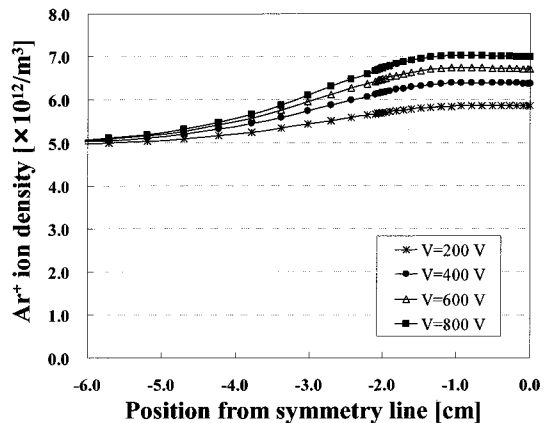


Fig. 13 Plasma(Ar⁺) density distribution for different RF voltages(section 2)

4. 결론

반도체 공정에서 식각 공정과 표면 세정 공정에 많이 이용이 되고 있는 용량 결합형 플라즈마에서 플라즈마 발생을 상용 소프트웨어인 CFD-ACE 를 이용하여 해석하였다. 100Pa 의 낮은 압력에서 13.56MHz, 200V 의 전압을 적용하여 해석하였고, 유전체 두께, 유전체와 전극 사이의 거리, 가스의 유입 속도, 그리고 전압에 따른 플라즈마 밀도를 관찰하였다.

해석의 결과 유전체의 두께가 얇을수록, 유전체와 전극 사이의 거리가 멀수록, 가스의 유입 속도가 빠를수록, 인가된 전압이 클수록 발생된 플라즈마 밀도가 큼을 알 수 있었다.

또한 실험을 통한 세정 및 식각 성능과 발생된 플라즈마 밀도와의 상관관계를 파악하면 해석 결과가 플라즈마 발생기 및 공정을 설계하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 서울테크노파크의 차세대 패키징 공정·장비 실용화사업(과제번호:10029793)의 일환으로 지식경제부 지원을 받아 수행되었으며, 또한, 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Sze, S. M., "Pina Technology, 2nd.," Mcgraw-Hill International, p. 184, 1988.
2. Lee, C. H., Kim, D. H., Lee, N. E. and Kwon, G. C., "Effect of different frequency combination on ArF photoresist deformation and silicon dioxide etching in the dual frequency superimposed capacitively coupled plasmas," Journal of Vacuum Science & Technology A, Vol. 24, No. 4, pp. 1386-1394, 2006.
3. Kim, Y. S., Lim, H. E., Han, S. H., Lee, Y. H. and Kim, Y. S., "Wettability and Aging Effect of Polystyrene Film Treated by PSII according to the Molecular Weight," Analytical Science & Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 229-235, 2002.
4. Cho, J. -H., Kang, B. -K., Kim, K. -S., Choi, B. -K., Kim, S. -H. and Choi, W. -Y., "Hydrophilic Effect of the Polyimide by Atmospheric Low-temperature Plasma Treatment," J. of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 18, No. 2, pp. 148-152, 2005.
5. Lee, E. S., Choi, J. H. and Baik, H. K., "Surface cleaning of indium tin oxide by atmospheric air plasma treatment with the steady-state airflow for organic light emitting diodes," Surface & Coatings Technology, Vol. 201, No. 9-11, pp. 4973-4978, 2007.
6. Hollander, A. and Behnisch, J., "Low pressure plasma treatments inside a closed package," Surface & Coatings Technology, Vol. 142-144, pp. 1074-1077, 2001.
7. Ko, S. K., "Molecular Design and Surface Modification by Ion beam/Plasma Irradiation," Report of Molecular Design and Surface Modification by Ion beam/Plasma Irradiation, pp. 19-22, 2000.
8. Kim, N. H., "Studies on the developing metal dry etcher with lower source power," Report of Energy/Resource Technology Development, pp. 10-16, 2006.
9. Jiang, W., Xu, X., Dai, Z. -L. and Wang, Y. -N., "Heating mechanisms and particle flow balancing of capacitively coupled plasmas driven by combined dc/rf sources," Physics of Plasmas, Vol. 15, No. 3, pp. 033502-033505, 2008.
10. Yi, C. H., Jeong, C. H., Lee, Y. H., Ko, Y. W. and Youm, G. Y., "Oxide surface cleaning by an atmospheric pressure plasma," Surface & Coatings Technology, Vol. 177-178, pp. 711-715, 2004.
11. Han, S. M., Kim, S. J., Park, J. H., Choi, S. H. and Han, M. K., "High quality nanocrystalline silicon thin film fabricated by inductively coupled plasma chemical vapor deposition at 350°C," J. of Non-crystalline Solid, Vol. 354, Issues 19-25, pp. 2268-2271, 2008.
12. Kolobov, V. I., "Fokker-Planck modeling of electron kinetics in plasmas and semiconductors," Computational Materials Science, Vol. 28, Issue 2, pp. 302-320, 2003.
13. Li, X., Li, L., Hua, X., Oehrlein, G. S., Wang, Y., Vasenkov, A. V. and Kushner, M. J., "Properties of C₄F₈ inductively coupled plasmas. I. Studies of Ar/C₄F₈ magnetically confined plasmas for etching of

- SiO₂,” Journal of Vacuum Science & Technology A, Vol. 22, No. 3, pp. 500-510, 2004.
14. Arslanbekov, R. R. and Kolobov, V. I., “Two-dimensional simulations of the transition from Townsend to glow discharge and subnormal oscillations,” J. of Phys. D: Appl. Phys., Vol. 36, No. 23, pp. 2986-2994, 2003.