

Plasma Chamber의 분석과 설계를 위한 종합적 Simulation Tool개발 : VIP-SEPCAD

홍선표*, 황일선*, 김헌창*, 설용태**
호서대학교 화학공학과*, 호서대학교 전기공학과**

Development of an Integrated Simulation Tool for Plasma Chamber Analysis and Design : VIP-SEPCAD

Seon Pyo Hong*, Il Sun Hwang*, Heon Chang Kim*, Yong Tea Sul**
Dept. of Chemical Engineering, Hoseo University*
Dept. of Electrical Engineering, Hoseo university**

서론

반도체 산업의 고집적회로 설계기술과 이에 수반되는 박막 처리기술의 핵심은 박막식각에 필수적으로 쓰이는 플라즈마 공정이다. 차세대 반도체 생산에 필요한 지속적인 집적회로 선평의 초미세화와 웨이퍼의 대구경화에 따라 더욱 엄격히 요구되는 공정조건을 만족시킬 수 있는 플라즈마 장치의 개발이 절실하게 요구되고 있다. 또한 급격히 발전하는 반도체 기술에 신속히 대처하기 위하여 개발단계에서부터 플라즈마 장비의 성능을 예측하고 분석하여 개발시간과 비용의 절감은 물론 장비의 성능을 극대화 할 수 있는 도구가 필요하다. 특히 실험적 방법과 함께 plasma chamber 내부에서 일어날 수 있는 여러 가지 복잡한 현상에 대한 이론적 모델의 전산모사를 통하여 플라즈마 장비의 종합적 성능분석을 효율적으로 할 수 있다.

본 연구에서는 plasma chamber 내부에서 일어나는 모든 물리·화학적 현상, particle 생성 및 성장과 이동현상 그리고 radical 및 양이온에 의한 박막 형성 및 식각 현상을 묘사할 수 있는 기초 이론적 모델의 개발과 개발된 모델들을 종합적으로 전산모사할 수 있는 환경, VIP-SEPCAD (Virtual Integrated Prototyping - Simulation Environment for Plasma Chamber Analysis and Design)를 개발하고 있다.

본론

본 연구에서 개발하고 있는 VIP-SEPCAD는 Figure 1.에 나타난 바와 같이 플라즈마의 물리·화학적 특성을 예측하는 plasma model, 중성 화학종들의 반응 및 유동 특성을 예측하는 neutral reaction-transport model, particle의 유동 특성을 예측하는 dust particle model, particle의 생성 및 성장 특성을 예측하는 particle formation-growth model, 웨이퍼 표면의 변화를 예측하는 surface evolution model로 구성되어 있다. 특히 구성모델들의 수정이나 추가가 용이하도록 module화 하였으며 현재 완성된 module들은 다음과 같다.

- Charged Species Module (CSM) : 플라즈마의 특성에 가장 영향을 많이 미치는 전자와 이온들의 거동모사는 전산속도가 Kinetic Model보다 빠르며 플라즈마 장치의 개발, 설계 그리고 운전조건 제어와 최적화에 필요한 변수들을 비교적 정확히 예측할 수 있는 Moment Model을 사용하였다 [1].
- ElectroMagnetic Module (EMM) : 전자와 이온들은 전기적 특성을 가지므로 전장에 의하여 영향을 가장 많이 받으며, 이에 따른 전자와 이온들의 거동은 다시 전장형성에 영향을 미친다. 이러한 전장의 형성은 간략화된 Maxwell 방정식으로부터 계산될 수 있으며 CSM과 함께 플라즈마 전산모사의 가장 중요한 부분이다.
- Neutral Species Module(NSM) : 플라즈마 공정에서 전자의 중요한 역할들 중 하나는 전기적으로는 중성이지만 박막처리에 직접 영향을 미치는 화학 반응성이 높은 radical과 metastable의 생성이다. 이러한 성분들의 총괄적인 거동은 Navier-Stokes식에 의하여

묘사되고 각 성분의 분포는 유체 흐름 속에서의 화학반응과 함께 확산식에 의하여 계산된다.

- Dust Particle Module(DPM) : 플라즈마 장비 안에는 수십 나노미터에서 수십 마이크로미터 크기의 수많은 미립자들이 존재하며 전자와 이온에 의하여 전하를 띠게 된다. 따라서 이들의 거동은 유체의 흐름과 더불어 전기장과 플라즈마의 특성에 영향을 받는다. 이러한 미립자의 거동은 각각의 미립자에 작용하는 모든 힘들을 고려하여 Lagrangian방식으로 추적하였다 [2].

또한 VIP-SEPCAD를 구성하는 각 module들을 Graphical User Interface(GUI)하에 통합하여 사용자가 plasma chamber 구조 설계 및 운전조건들을 입력하고 필요한 module들을 사용하여 전산모사하는 동안 계산결과를 지속적으로 분석할 수 있도록 하였다. Figure 2.는 원료가스가 showerhead를 통하여 주입되는 Capacitively Coupled Plasma (CCP) chamber 구조를 설계하는 화면을 나타낸다.

Figure 2.에서 설계된 plasma chamber 구조와 CSM, EMM, NSM과 DPM을 이용하여 photoresist를 식각하거나 산화막을 증착시킬 때 사용되는 산소 플라즈마에 대하여 전산모사를 하였다. 산소 플라즈마에는 전자, 양이온(O_2^+ , O^+), 음이온(O_2^- , O^-), 안정한 산소 분자 및 원자(O_2 , O)와 함께 여기상태의 metastable들이 공존하며 전자에 의한 electron impact reaction에 의하여 생성된다. 본 연구에서는 총 24종류의 electron impact reaction과 함께 24개의 이온과 중성성분사이의 반응을 고려하여 공정압력 500mTorr에서 하단의 전극에 150V의 전압을 인가했을 때 전산모사된 플라즈마 특성을 Figure 3.에 나타내었다. 산소 플라즈마의 경우 전자밀도의 분포를 보면 electropositive plasma와 달리 bulk plasma 영역에서 거의 균일하게 분포되어 있고 양이온 O_2^+ 와 전기적으로 중성화 시키려는 성분이 음이온인 electronegative plasma의 특성을 지닌다. 또한 중성성분의 밀도분포를 보면 electron impact reaction에 의하여 생성된 산소분자의 metastable인 $O_2(a^1\Delta_g)$ 가 기저상태의 산소원자 $O(^3P)$ 와 같이 웨이퍼가 놓이는 하단의 전극에 많은 양이 도달한다. 이 결과로부터 photoresist를 식각하거나 산화막을 증착시킬 때 산소분자의 metastable도 중요한 역할을 할 수 있을 것이라 추측된다.

플라즈마 공정에서 sputtering, homogeneous/heterogeneous reaction 등 여러 경로를 통하여 particle이 발생할 수 있으며 particle의 핵이 형성되면 응집이나 응축에 의하여 성장하게 된다. 본 논문에서는 산소플라즈마 환경에서 이미 성장된 particle들의 거동에 대하여 전산모사하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 plasma chamber 내부에 존재하는 particle의 거동은 Figure 3. 나타낸 플라즈마의 특성과 Figure 4.(a)에 나타낸 유체의 흐름에 의하여 영향을 받으며 Figure 4.(b)에 나타낸 바와 같이 중력의 영향, 온도차에 의한 열영동 효과 그리고 Brownian 운동도 고려하였다. 또한 particle의 크기를 $d_p=10^0\sim 10^1\text{nm}$, $d_p=10^1\sim 10^2\text{nm}$, $d_p=10^2\sim 10^3\text{nm}$ 세 그룹으로 나누어 각 경우 10^4 개의 particle이 plasma chamber 내부에 random하게 분포되어 있다고 가정하였다. Figure 5.는 particle들이 주위에서 작용하는 여러 가지 힘에 의하여 유동하다가 정상상태에 도달했을 때 particle 크기에 따라 plasma chamber 내부에 분포되어 있는 형태를 나타낸다. 일반적으로 대기중에 있는 particle에 작용하는 힘은 gravitational force, neutral drag force, thermophoresis와 Brownian force가 있으며 particle의 크기에 영향을 받는다. 특히 플라즈마내에 존재하는 particle들은 주위의 전자와 이온들이 표면에 축적되어 전하를 띠게 된다. 이온에 비하여 전자의 무게는 상대적으로 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에 전체적으로 음전하를 띠게 된다. Plasma potential은 Figure 3.(a)에 보인 바와 같이 plasma chamber의 벽보다 높기 때문에 음전하를 띠는 particle들은 plasma sheath에 생기는 강력한 전장에 의하여 작용하는 electrostatic force에 의하여 bulk plasma 쪽으로 밀리게 된다. 반면에 양전하를 띠는 이온은 반대로 bulk plasma에서 plasma chamber의 벽 쪽으로 움직이며 particle을 끌어가는 ion drag force도 작용하며 역시 particle의 크기에 영향을 받는다. 이와 더불어 gravitational force, neutral drag force,

thermophoresis와 Brownian force 등 모든 힘들이 평형을 이루는 곳에서 particle들이 모이게 된다. Figure 5.에 나타낸 바와 같이 크기가 비교적 큰 particle들은 neutral force에 영향을 많이 받아 공정가스가 빠져나가는 곳으로 따라가다 강력한 전장에 의하여 pumping port로 완전히 빠져나가지 못하고 웨이퍼가 놓이는 전극의 가장자리에서 머문다. 아주 작은 particle들은 neutral drag force의 영향을 크게 받지 않고, 크기가 작을수록 thermophoretic force와 Brownian force의 작용이 상대적으로 증가하여 electrostatic force와 함께 bulk plasma에 남아있도록 만든다.

결론

본 연구에서는 반도체제조에 필수적으로 사용되는 플라즈마 장비의 개발단계에서부터 성능을 예측하고 분석하여 개발시간과 비용의 절감, 장비의 성능을 극대화 할 수 있는 전산 모사 환경인 VIP-SEPCAD를 개발하고 있다. VIP-SEPCAD는 플라즈마의 물리·화학적 특성을 예측하는 plasma model (CSM/EMM), 중성 화학종의 반응 및 유동 특성을 예측하는 neutral reaction-transport model (NSM), particle의 유동 특성을 예측하는 dust particle model (DPM), particle의 생성 및 성장 특성을 예측하는 particle formation-growth model (PFM), 웨이퍼 표면의 변화를 예측하는 surface evolution model (SEM)로 구성되어 있다. 현재 완성된 CSM/EMM, NSM, DPM을 사용하여 산소플라즈마를 이용하는 공정에서 플라즈마의 특성 및 화학종의 분포를 예측하였고, 산소플라즈마에 존재하는 particle의 거동에 대하여 분석하였다. 앞으로 PFM과 SEM을 개발하여 VIP-SEPCAD에 통합시키면 주어진 플라즈마 공정조건에 따라 웨이퍼 표면에 식각 또는 증착에 의하여 생성되는 trench geometry 및 uniformity를 예측하고 particle 생성을 최대한 억제 또는 효과적으로 제거할 수 있는 기술 개발에 도움이 될 수 있을 것이다.

감사

본 연구는 과학기술부와 산업자원부의 지원으로 한국반도체연구조합이 총괄하는 시스템집적반도체기반기술개발사업의 연구과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Heon Chang Kim and Vasilios I. Manousiouthakis, "Simulation based plasma reactor design for improved ion bombardment uniformity", Journal of Vacuum Science & Technology B., 18(2), 841-847, 2000.
- [2] Heon Chang Kim and Vasilios I. Manousiouthakis, "Dust transport phenomena in a capacitively coupled plasma reactor", Journal of Applied Physics, 89(1), 34-41, 2001.

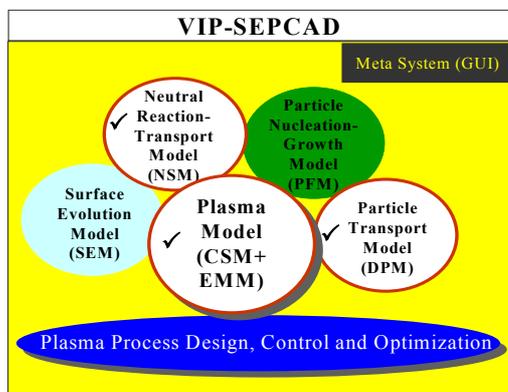


Figure 1. VIP-SEPCAD structure

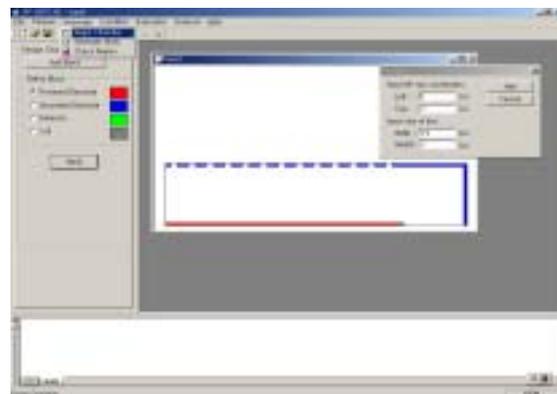


Figure 2. VIP-SEPCAD GUI

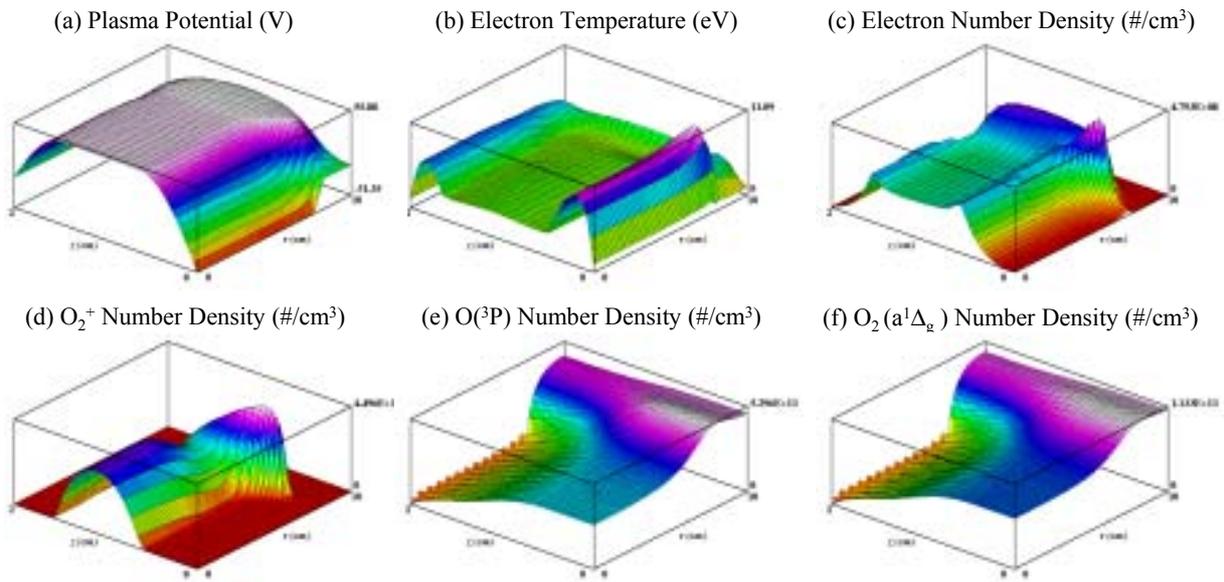


Figure 3. Time-averaged oxygen plasma properties.

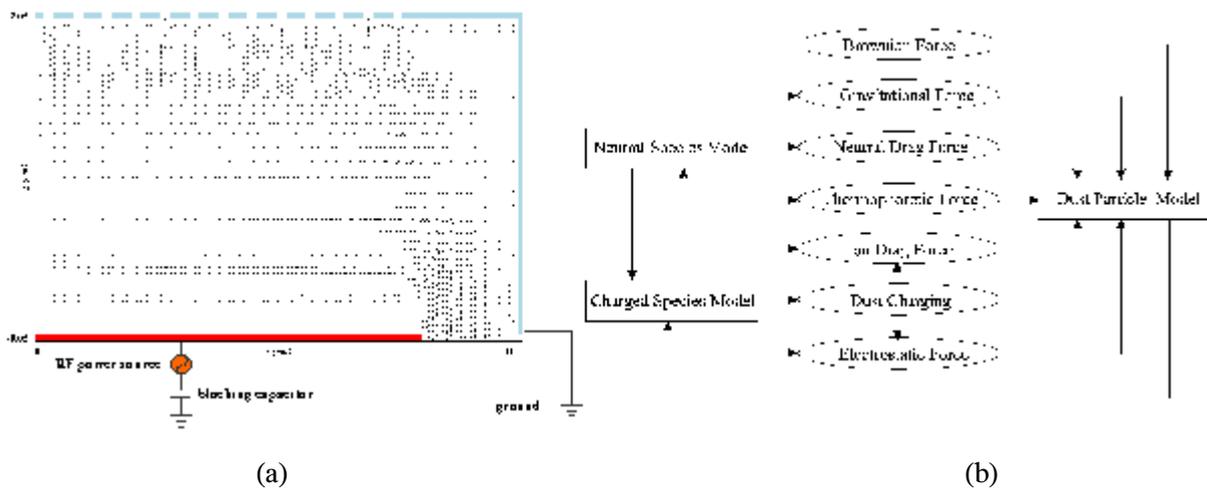


Figure 4. (a) Fluid flow and (b) dust particle tracking scheme in oxygen plasma chamber

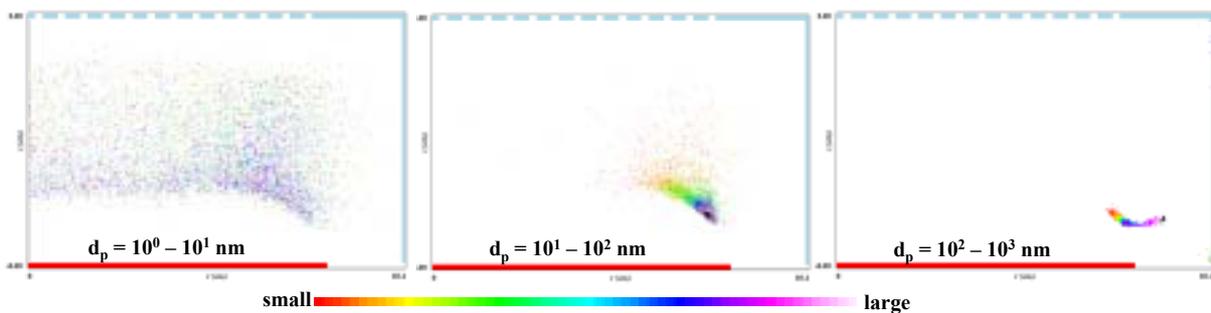


Figure 5. Size dependent trapped location of particles in oxygen plasma chamber