

# Virtual Integrated Prototyping Simulation Environment for Plasma Chamber Analysis and Design

김현창, 김성재, 황일선

\* 호서대학교 환경안전공학부 화학공학전공

## 초록

본 연구에서는 반도체제조에 필수적으로 사용되는 플라즈마장비의 성능을 예측·분석하여 개발 시간 및 비용의 절감과 장비의 성능을 극대화 할 수 있도록 이론적 전산모사 환경(VIP-SEPCAD)을 개발하고 있다. VIP-SEPCAD는 플라즈마의 물리·화학적 특성을 예측하는 plasma model, 중성화학종들의 반응 및 유동 특성을 예측하는 neutral reaction-transport model, particle의 유동 특성을 예측하는 particle transport model, particle의 생성 및 성장 특성을 예측하는 particle formation-growth model, 식각 또는 증착되는 웨이퍼 표면변화를 예측하는 surface evolution model로 구성되어 있다. 현재 개발된 VIP-SEPCAD를 이용하여 산소 플라즈마의 특성과 각종 화학성분들의 분포를 예측하고 particle의 거동에 대하여 분석하였다.

## 1. 서론

반도체산업의 고집적회로설계기술에 수반되는 박막처리기술의 핵심은, 박막식각에 필수적으로 쓰이는 플라즈마 공정이다. 차세대 반도체 생산에 있어서 지속적인 집적회로 선평의 초미세화와 웨이퍼의 대구경화에 따라 더욱 엄격히 요구되는 공정조건을 만족시킬 수 있는 플라즈마 장치의 개발이 절실하게 요구되고 있다. 또한 급격히 발전하는 반도체기술에 신속히 대처하기 위하여 개발단계에서부터 플라즈마장비의 성능을 예측·분석하여 개발 시간 및 비용의 절감은 물론 장비성능의 극대화가 필요하다. 이는 실험적 방법과 함께 plasma chamber 내부에서 일어날 수 있는 여러 가지 복잡한 현상에 대한 이론적 모델의 전산모사를 통한 플라즈마장비의 종합적 성능분석을 효율적으로 함으로서 가능하다. 본 연구에서는 plasma chamber 내부에서 일어나는 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 함께 종합적으로 전산모사할 수 있는 환경, VIP-SEPCAD (Virtual Integrated Prototyping - Simulation Environment for Plasma Chamber Analysis and Design)를 개발하고 있다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서 개발하고 있는 VIP-SEPCAD는 Figure 1.에 나타낸 바와 같이 플라즈마의 물리·화학적 특성을 예측하는 plasma model, 중성 화학종들의 반응 및 유동 특성을 예측하는 neutral

reaction-transport model, particle의 유동 특성을 예측하는 particle transport model, particle의 생성 및 성장 특성을 예측하는 particle formation-growth model, 웨이퍼 표면의 변화를 예측하는 surface evolution model로 구성되어 있다. VIP-SEPCAD를 구성하는 모델들은 수정 또는 추가가 용이하도록 module화 하였으며 현재 완성된 module들은 다음과 같다.

- Charged Species Module (CSM) : 플라즈마의 특성에 가장 영향을 많이 미치는 전자와 이온들의 거동모사는 신속하게 플라즈마장치의 개발 및 설계, 운전조건의 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) : 플라즈마공정에서 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 화학반응을 동반한 확산식에 의하여 계산된다.
- Particle Transport Module(PTM) : 플라즈마 장비 안에는 수십 나노미터에서 수십 마이크로미터 크기의 수많은 미립자들이 존재하며 전자와 이온에 의하여 전하를 띄게 되어 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 chamber의 구조설계, 운전조건의 입력, 필요한 module들을 선택하여 전산모사 동안 지속적으로 결과분석 할 수 있도록 하였다. Figure 2.는 원료가스가 showerhead를 통하여 주입되는 Capacitively Coupled Plasma (CCP) chamber 구조를 설계하는 VIP-SEPCAD의 화면을 나타낸다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Figure 2.에서 설계된 plasma chamber 구조에서 CSM, EMM, NSM과 PTM을 이용하여 photoresist 식각이나 산화막증착에 사용되는 산소 플라즈마에 대하여 전산모사를 하였다. 산소플라즈마에는 electron impact reaction에 의하여 생성된 전자, 양이온( $O_2^+$ ,  $O^+$ ), 음이온( $O_2^-$ ,  $O^-$ ), 안정한 산소분자 및 원자( $O_2$ ,  $O$ )와 함께 여기상태의 metastable들이 공존한다. 총 24종류의 electron impact reaction과 함께 24개의 이온과 중성성분사이의 반응을 고려하여 500mTorr에서 웨이퍼가 놓이는 하단전극에 150V의 전압을 인가했을 때 전산모사에 의하여 예측된 플라즈마특성을 Figure 3.에 나타내었다. 산소플라즈마의 경우 전자밀도의 분포를 보면 아르곤플라즈마와 같은 electropositive plasma와 달리 bulk plasma 영역에서 거의 균일하게 분포되어 있고 양이온과 전기적으로 준중성상태를 유지하려는 성분이 음이온인 electronegative plasma의 특성을 지닌다. 또한 중성성분의 밀도분포를 보면 electron impact reaction에 의하여 생성된 산소분자 metastable의 한 종류인  $O_2(a^1\Delta_g)$ 가 기저상태의 산소원자  $O(^3P)$ 와 같이 웨이퍼가 놓이는 하단전극에 많은 양이 도달한다. 이 결과로부터 photoresist를 식각하거나 산화막을 증착시킬 때 산소분자 metastable도 중요한 역할을 할 것이라 예측할 수 있다.

플라즈마공정에서 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 특성, plasma chamber 내부의 유체흐름, 중력과 Brownian 운동에 의하여 영향을 받는다. Figure 4.는 particle들이 주위에서 작용하는 여러 힘에 의하여 유동하다가 정상상태에 도달했을 때 particle 크기에 따라 plasma chamber 내부에 분포되어 있는 형태를 나타낸다. 플라즈마 내에 존재하는 particle들은 주위의 전자와 이온들이 표면에 축적되어 전체적으로 음전하를 띠게 된다. 플라즈마전위는 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. 또한 양전하를 띠는 이온이 bulk plasma에서 plasma chamber벽 쪽으로 움직이며 particle을 끌어가는 ion drag force의 영향을 받는다. 이와 더불어 gravitational force, neutral drag force와 Brownian force 등 모든 힘들이 평형을 이루는 곳에서 particle들이 모이게 된다. Figure 4.에 나타낸 바와 같이 비교적 큰 particle들은 neutral force에 가장 영향을 많이 받아 공정가스가 빠져나가는 곳으로 따라가다 강력한 전장에 의하여 pumping port로 완전히 빠져나가지 못하고 웨이퍼가 놓이는 전극의 가장자리에서 축적됨을 알 수 있다. 아주 작은 particle들은 neutral drag force의 영향을 크게 받지 않고 Brownian force와 electrostatic force에 의하여 bulk plasma에 남아 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 반도체제조에 필수적으로 사용되는 플라즈마장비의 개발단계에서부터 성능을 예측·분석하여 개발시간과 비용의 절감, 장비의 성능을 극대화 할 수 있는 전산모사 환경인 VIP-SEPCAD를 개발하고 있다. VIP-SEPCAD의 CSM/EMM, NSM, PTM을 사용하여 산소플라즈마의 특성 및 각종 화학성분의 분포를 예측하고 particle의 거동에 대하여 분석하였다. 현재 개발중인 PFM과 SEM을 VIP-SEPCAD에 통합하여 주어진 플라즈마공정조건에 따라 웨이퍼 표면에 식각 및 증착에 의하여 생성되는 trench geometry 및 uniformity를 예측하고 particle 생성을 최대한 억제 또는 효과적으로 제거할 수 있는 기술개발에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후기

본 연구는 한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 호서대학교 반도체제조장비국산화연구센터의 연구지원에 의해 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.

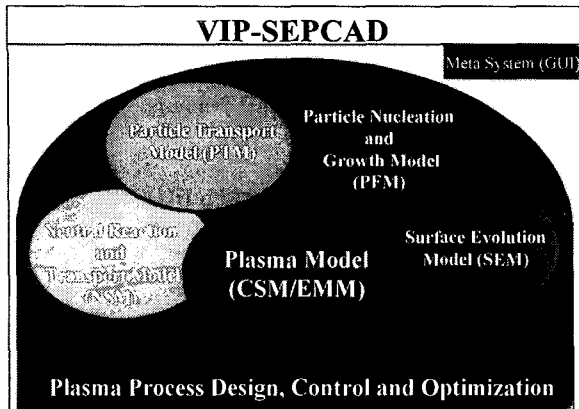


Figure 1. VIP-SEPCAD structure

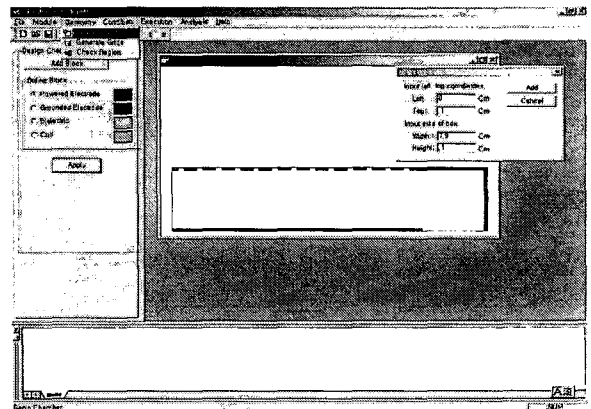


Figure 2. VIP-SEPCAD GUI

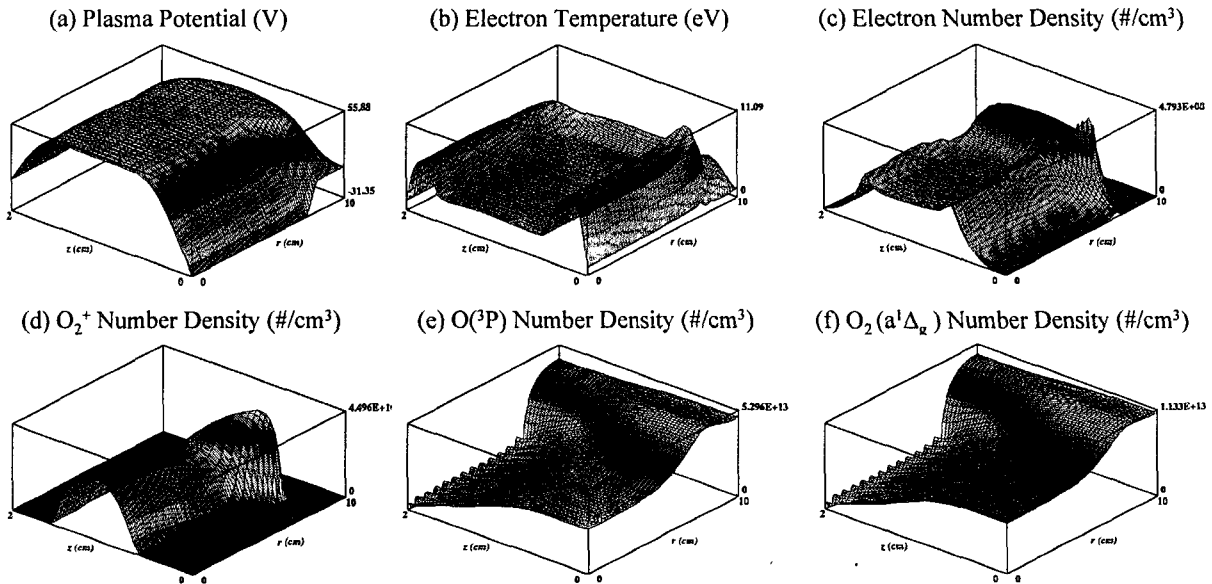


Figure 3. Time-averaged oxygen plasma properties.

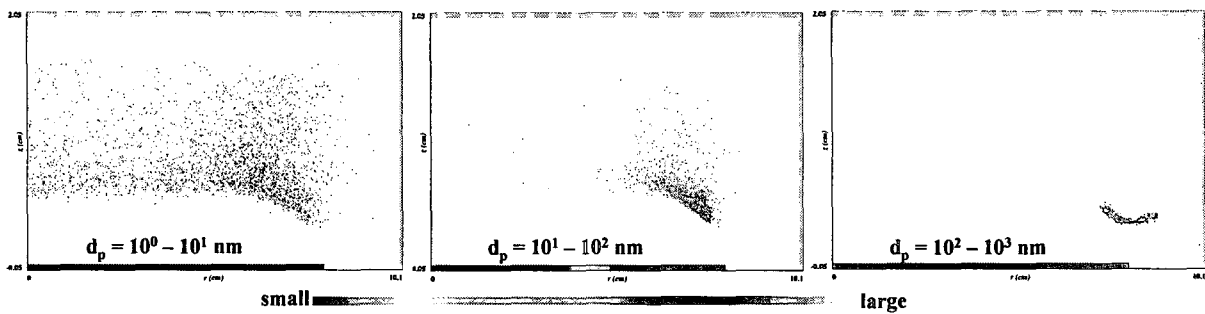


Figure 4. Size dependent trapped locations of particles in an oxygen plasma chamber.