

## 반도체 식각 공정용 공간 평균 시뮬레이터 및 데이터베이스 개발

## Development of a Global Simulator and Databases for Semiconductor Etching Processes

권득철<sup>a\*</sup>, 이세아<sup>b</sup>, 장원석<sup>a</sup>, 송미영<sup>a</sup>, 윤정식<sup>a</sup>, 유동훈<sup>c</sup>, 김대웅<sup>d</sup>, 유신재<sup>d</sup>, 임연호<sup>b</sup><sup>a\*</sup>국가핵융합연구소(E-mail:dckwon@nfri.re.kr), <sup>b</sup>전북대학교 화학공학과, <sup>c</sup>㈜경원테크, <sup>d</sup>한국표준과학연구원

**초 록:** 최근 개발된 수치해석 알고리즘 및 RF sheath 모델을 적용하여 반도체 식각 공정용 공간 평균 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터는 전자가열 모듈, 수송 모듈, 그리고 RF sheath 모듈로 구성된다. 유도결합 플라즈마원에 대한 전자가열모듈은 비충돌 과정인 anomalous skin effect가 포함된 Yoon의 모델을 적용하였고, 축전결합 플라즈마원에 대해서는 RF sheath 모델을 수치적으로 풀어 흡수된 파워를 결정하고 수송 모듈과 일관성을 잃지 않게 결합되었다. RF sheath 모듈에서는 Dai의 collisionless sheath 모델을 적용하였고 RF 필싱이 적용될 수 있도록 확장하였다. 특히, 식각 공정에 사용되는 fluorocarbon 플라즈마에 대한 데이터베이스를 개발하였고, 또한 진단 데이터와의 비교를 통해 데이터베이스를 최적화하였다.

## 1. 서론

고밀도 플라즈마원의 시뮬레이션을 위해 입자, 운동, 유체, 그리고 하이브리드 모델과 같은 다양한 모델들이 개발되어 왔다. 그중에서 유체모델은 플라즈마 변수에 대한 전체적 이해가 용이하여 널리 적용되고 있다. 그러나 플라즈마 주파수가 매우 높고 sheath 길이가 챔버에 비해 매우 짧아 안정적인 시뮬레이션을 수행하는데 제약이 있는 게 현실이다. 따라서 시공간 제약을 극복하기 위한 다양한 수치해석 방법과 경계 조건이 제시되어 왔다. 수치해석 방법과 컴퓨팅 환경의 발전에도 불구하고 다차원 모델링의 효율성 측면에서 여전히 극복할 제약이 있다.

따라서 공간 평균 플라즈마 모델은 장치 및 인가한 파워, 압력, 그리고 유량 등과 같은 장치 외부 변수에 대한 공간 평균한 플라즈마 변수를 얻을 수 있어 널리 사용되고 있다. 비록 플라즈마 변수의 공간 의존성은 분석할 수 없지만, 제한적인 컴퓨팅 환경에서 다차원 시뮬레이션에서는 적용하기 어려운 많은 수의 반응을 고려할 수 있다는 장점이 있다[1].

본 연구에서는 최근 본 연구 그룹에서 개발된 수치해석 알고리즘[2]을 적용하여 계산 속도를 향상시켰다. 그리고 RF sheath 모듈에서는 Dai의 collisionless sheath 모델[3]을 적용하였고 RF 필싱이 적용될 수 있도록 확장하였다. 특히, 식각 공정에 사용되는 fluorocarbon 플라즈마에 대한 데이터베이스를 개발하였고, 또한 진단 데이터와의 비교를 통해 데이터베이스를 최적화하였다.

## 2. 본론

개발된 시뮬레이터는 크게 핵심적인 물리, 화학적 양들을 계산하는 기능의 시뮬레이션 부분과 장치 및 장치외부 변수를 입력하고 계산된 결과를 시각화하는 graphic user interface (GUI) 부분으로 구성된다. 시뮬레이션 부분은 다시 전자가열 모듈, 수송 모듈, 그리고 sheath를 포함하는 RF sheath 모듈로 구분된다.

전자가열 모듈의 기능적인 역할은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 수송 모듈과 연계되어 전자의 파워 흡수량을 계산하는 것과 전체 등가 회로의 소자 값들을 산출하는 것이다. 특히 10 mTorr 이하의 저압조건에서는 비충돌에 의한 anomalous skin effect (ASE) 과정이 반드시 고려되어야 한다는 것이 선행연구결과를 통해 학술적으로 입증된 바 있다. 따라서 유도결합 플라즈마원에 대한 전자가열 모듈은 ASE가 고려된 Yoon의 2차원 전자가열 모델을 사용하였다[4]. 본 연구에서, 축전결합형 플라즈마원에서 전자의 파워 흡수량은 RF sheath 모델을 풀어 결정하였고 수송 모듈과 일관성을 잃지 않게 결합되었다.

하전입자 및 중성종을 포함하는 플라즈마 수송 모듈의 기본 방정식은 공간 평균한 연속 방정식과 전자 온도 방정식으로 구성된다. 비록 공간 평균한 수송 방정식일지라도 고려되는 종과 반응의 개수가 증가하면 시뮬레이션 속도 또한 무시할 수 없게 된다. 따라서 본 연구에서는 최근 본 연구진에 의해 개발된 feed-back 방법이 응용된 알고리즘을 적용하였다[2]. 하전입자 및 중성종을 포함하는 플라즈마 수송 모듈이 특정한 가스 방전에 적용되기 위해서는 물리, 화학적 반응들에 대한 계수들이 확보되어야 한다. 복잡가스 방전에 연관된 반응의 종류가 수십 가지에 이르는 경우가 많은 상황을 고려하면, 이러한 물리, 화학적 데이터베이스의 구축은 시뮬레이션의 활용도를 높이기 위해 매우 중요한 요소 중 하나라 할 수 있다. 그러나 데이터들이 누적되어 하나의 가스 방전에 대한 데이터들이 밝혀지고, 그러한 데이터들이 누적되어 하나의 가스 방전에 대한 종합 데이터가 구성되는 과정을 거친 후에야 시뮬레이션이 적용될 수 있는 상황을 고려하면, 이러한 데이터베이스 구축은 매우 어려운 일이 아닐 수 없다. 그러한 이유로 인해 현재 시뮬레이션에 직접 적용될 수 있는 방전 데이터들은 상당히 제한적인 상황이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식각 공정에 사용되는 가스 데이터를 수집하고 존재하지 않는 데이터에 대한 반응에 대한 계수는 이론적인 모델을 적용하여 종합 데이터를 구성한 후, 실험에서 측정되는 밀도와 직접 비교하여 반응계수에 대한 데이터를 최적화하였다.

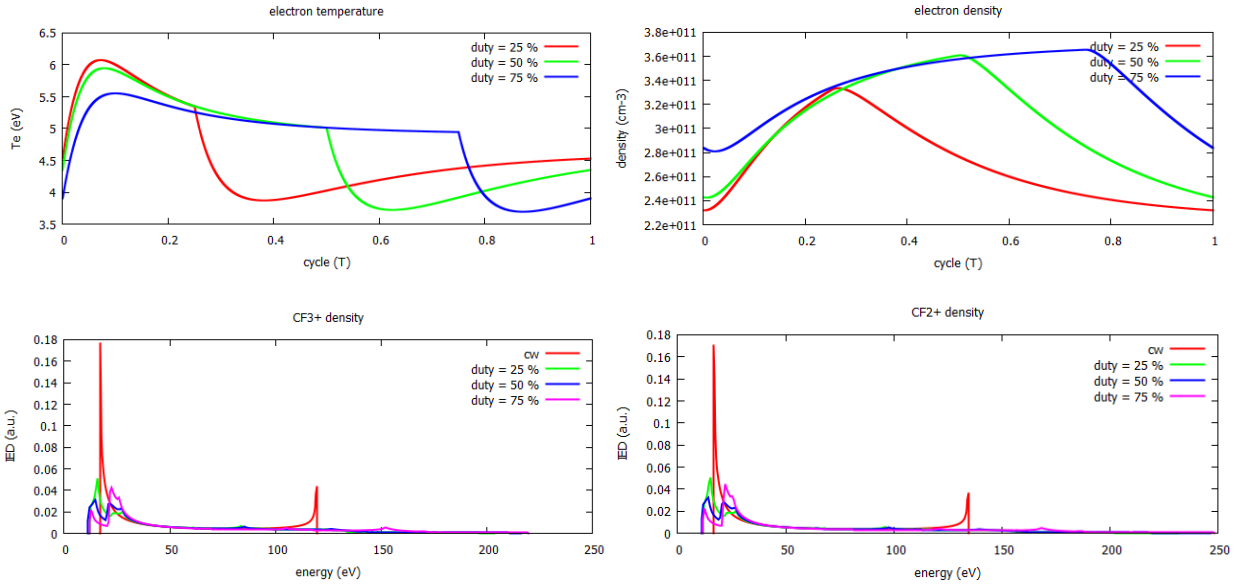


Fig. 1.  $\text{CF}_4$  방전에서 전자 온도, 전자 밀도, 그리고  $\text{CF}_3^+$  및  $\text{CF}_2^+$  이온의 에너지 분포

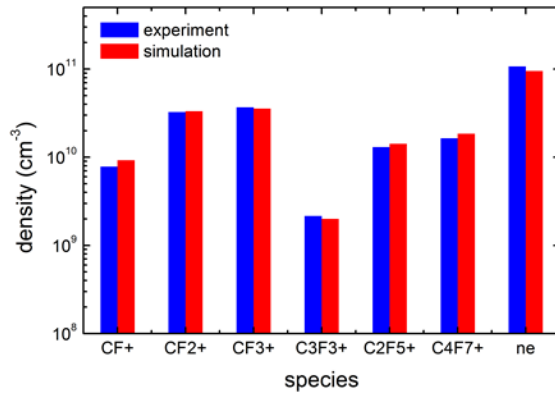


Fig. 2.  $\text{C}_4\text{F}_6/\text{Ar}$  방전에서 주요 하전입자의 실험 결과와 시뮬레이션 비교

그림 1은 개발된 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 예로, 유도 결합 플라즈마의  $\text{CF}_4$  방전에서 소스 및 바이어스 파워를 펄싱하였을 때, 전자 온도, 전자 밀도, 그리고 주요 하전입자인  $\text{CF}_3^+$ 와  $\text{CF}_2^+$  이온 에너지 분포이다. Duty cycle에 따라 플라즈마 변수와 이온 에너지 분포가 변화하는 것을 알 수 있다. 여기서 소스 파워는 1000/500 W (10 MHz)를 10 kHz로 펄싱하였고 바이어스 파워는 400 W (2 MHz)를 10 kHz로 펄싱하였다. Turn on 된 후 전자 온도가 급격히 증가한 후 감소하는 것은 기존에 발표된 문헌과 정성적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 2는  $\text{C}_4\text{F}_6/\text{Ar}$  방전에서 주요 하전입자의 진단 데이터와 시뮬레이션 비교 결과로, 시뮬레이션 결과와 진단데이터와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 연구에서는 최근 개발된 수치해석 알고리즘과 확장된 RF sheath 모델을 적용하여 반도체 식각 공정용 공간 평균 시뮬레이터를 개발하였다. 특히, 식각 공정에 사용되는 fluorocarbon 플라즈마에 대한 데이터베이스를 개발하였고, 또한 진단 데이터와의 비교를 통해 데이터베이스를 최적화하였다. 개발된 시뮬레이터는 반도체 공정의 최적화나 장비의 설계 도구로 활용될 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. D. C. Kwon, W. S. Chang, M. Park, D. H. You, M. Y. Song, S. J. You, Y. H. Im, and J. S. Yoon, *J. Appl. Phys.* **109**, 073311 (2011).
2. D. C. Kwon, M. Y. Song, J. S. Yoon, and N. S. Yoon, to be published.
3. Z. L. Dai, Y. N. Wang, and T. C. Ma, *Phys. Rev. E* **65**, 036403 (2002).
4. N. S. Yoon, S. M. Hwang, and D. I. Choi, *Phys. Rev. E* **55**, 7536 (1997).