

논문 2013-50-10-14

# 플라즈마 식각 시뮬레이션을 위한 스캔 방식의 이온 플럭스 계산 방법

( Scanning System Method for Calculating Ion Flux in Plasma Etching  
Simulation )

신 성 식\*, 유 동 훈\*\*, 권 오 봉\*\*\*

( Sung-Sik Shin<sup>Ⓢ</sup>, Dong-Hun Yu, and Ou-Bong Gwun )

## 요 약

플라즈마(Plasma) 공정 시뮬레이션에서 가장 중요한 요소는 식각(Etching) 과정으로 특성 정보 프로파일(Feature Profile)에 의존하는 식각 비율(Etch Rate)을 계산하는 것이다. 식각 비율을 결정 요소는 이온 플럭스(Ion Flux), 뉴트럴 플럭스(Neutral Flux), 가스 중 온도 등 다양하지만 본 논문에서는 이온 플럭스(Ion Flux)에 한정하여 고속으로 이온 플럭스를 계산하기 위한 스캔 방법을 제안 했다. 그리고 일반적으로 많이 사용되어지는 몬테카를로(Monte Carlo) 방법과 제안 방법을 가우시안 분포 및 코사인 분포를 이용하여 실험하고 서로 비교 분석하였다. 본 논문에서 제안한 방법이 몬테카를로 방법과 비교 했을 때 보다 효율적으로 정확한 이온 플럭스를 계산 할 수 있음을 검증하였다.

## Abstract

The most important thing in Plasma simulation is the etching process in which etch rate is calculated based on feature profile. Although there are various components to consider in calculating etch rate such as Ion Flux, Neutral, gas, and temperature, Addressing of this paper is limited to Ion Flux. This paper propose a scan method to compute Ion Flux faster for Plasma simulation. Also, this paper experiments and compares generally used Monte Carlo method and the proposed method based on gaussian and cosine distribution. Lastly, this paper proves that the proposed method can calculate accurate Ion Flux more efficiently than Monte Carlo method.

**Keywords** : Ion Flux, Etching Process, Scan Method, Plasma Simulation, Monte Carlo Method

## I. 서 론

\* 학생회원, \*\*\* 정회원, 전북대학교 전자정보공학부  
(Division of Computer Science and Engineering,  
Chonbuk National University)

\*\* 학생회원, 전북대학교 화학공학부  
(Chemical Engineering and Technology, Chonbuk  
National University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: gshinnom@gmail.com)

※ 이 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구  
구입(NRF-2012R1A1A2006962)

접수일자: 2013년8월2일, 수정완료일: 2013년10월3일

최근 반도체 시장은 국제간의 극심한 경쟁으로 개발 및 생산 기간의 단축을 요구하고 있고, 시뮬레이터를 이용하면 개발 기간을 효과적으로 단축 할 수 있어 칩 개발 및 생산과 관련된 시뮬레이터의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 식각 공정과 관련된 여러 가지 시뮬레이션 모델이 제시되고 있다<sup>[1~3]</sup>.

반도체 생산 과정은 산화공정(Oxidation Layering),

포토 에치(Photo Etch), 식각 공정 등 다양한 과정이 있으며 이 중에서 가장 중요한 공정 과정이 식각 공정으로 플라즈마를 이용한다. 플라즈마는 물질의 제4의 형태로 이온과 라디칼이 존재하며 끊임없는 상호작용을 일으키고 성분과 농도는 오직 온도에 의하여 결정된다.

플라즈마 식각은 크게 건식 식각(Dry Etch)과 습식 식각(Wet Etch)으로 분류 된다<sup>[4]</sup>. 습식 식각은 반응성 용액을 사용하여 물질을 선택적으로 제거할 때 사용하는 방법으로 고전적으로 많이 사용되어 온 방법이다. 건식 식각은 습식 식각과는 달리 반응성 기체 혹은 증기나 이의 이온이나 분해된 가스를 이용하여 물질을 선택적으로 제거하는 방법으로 이방성식각(Isotropic Etch)을 한다. 본 논문에서 대상으로 하는 식각은 건식 식각을 말한다.

플라즈마 식각 공정의 시뮬레이션 단계는 크게 5단계로 나누어진다<sup>[5]</sup>.

첫 째, 웨이퍼의 특성 정보 프로파일을 이산화 하여 시뮬레이션이 가능한 상태[그림 3]로 만든다. 특성 정보 프로파일의 이산화는 시뮬레이션이 가능하도록 프로파일을 일정한 사이즈의 셀(Triangle 또는 Polygon)로 분할하는 것을 이야기 한다.

둘 째, 플라즈마 입자를 특성(에너지의 크기 등)에 맞추어 반응실(Chamber) 내부에 분산 한다. 입자는 특성에 따라 서로 다른 분포를 가지고 있으며 시뮬레이션 상황에 맞추어 분산하도록 해야 한다.

셋 째, 분산 된 입자가 이산화 된 프로파일의 반응 표면에서 받아들여지는 비율(Flux Rate)을 계산한다. 서로 다른 크기의 셀과 입자의 분포율의 비율을 고려하여 이온 플럭스 양을 계산 한다.

넷 째, 반응 표면에 받아들여진 이온 플럭스 양과 물질의 반응식을 이용하여 실제 식각 비율<sup>[6]</sup>을 계산한다.

다섯 째, 계산 되어진 식각 비율에 따라서 프로파일의 반응표면을 이동 시킨다.

위와 같은 방법으로 식각 공정의 시뮬레이션이 이루어지며 원하는 결과가 나올 때까지 2~5단계를 반복적으로 수행 한다.

본 논문에서는 두 번째와 세 번째 단계에서 수행하는 공정을 모사하기 위하여 몬테카를로 정도의 정확도를 유지하면서 처리시간을 향상 시킬 수 있는 스캔 방법을 II장에서 제안한다, III장에서는 이를 가우시안 분포와

코사인 분포로 나누어 확률 기반의 몬테카를로 방법과 비교분석하고 그 결과를 제시하고 IV장에서 결론을 내린다.

## II. 이온 플럭스 계산

### 1. 몬테카를로 방법

몬테카를로 시뮬레이션은 불확실한 상황에서 의사결정을 목적으로 확률적 시스템의 모의실험에 이용되는 절차를 말하며 이온 플럭스를 계산하기 위해서는 원점(입자 방출점)에서부터 수백만 개에서 수천만 개의 입자를 분산시켜 취합되는 결과를 확률로 계산 한다<sup>[7][8]</sup>.

몬테카를로 방법은 [그림 1]에서와 같이 확률의 정확도를 높이기 위하여, 즉 정확한 가우시안 분포를 만들기 위해서는 많은 수의 입자 분산이 필요하다.

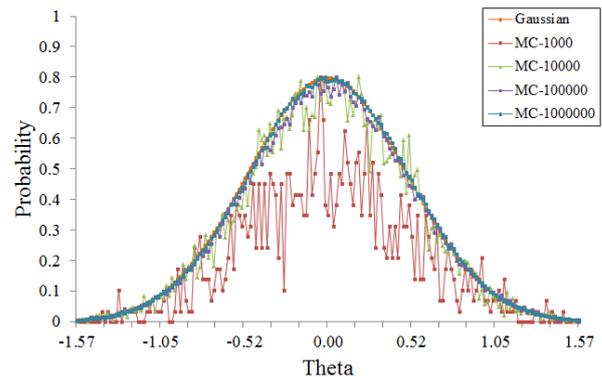


그림 1. 가우시안 분포와 몬테카를로 방법의 확률 비교  
Fig. 1. Probability Density Function of Gaussian Distribution and Its Monte Carlo Method.

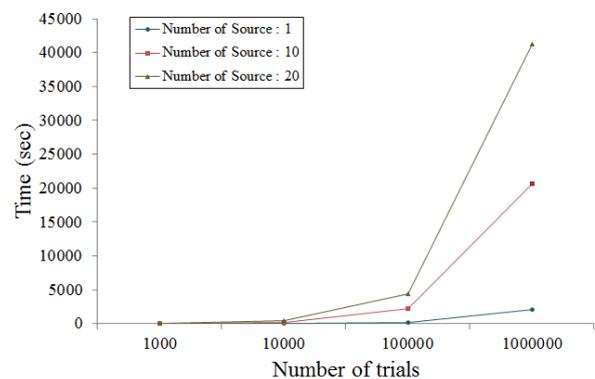


그림 2. 입자의 원점 개수와 분산 횟수에 따른 시간 비교  
Fig. 2. Processing Time depended on Source Number and Scattering Number.

[그림 1]은 가우시안 분포로 표준편차  $\sigma = 0.5$  일 때 식에 의한 분포와 몬테카를로 방법을 이용하여 각각 천 개, 만 개, 십만 개, 백만 개의 입자를 분산한 결과를 비교한 그래프이다. 입자의 개수가 증가 할수록 식에 의한 분포와 시뮬레이션을 이용한 분포의 오차율이 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

최소 십만 개 이상 일 때 비교적 시뮬레이션에 적용 가능한 정확도를 확보 할 수 있다.

식각 시뮬레이션을 할 때는 입자가 분산되는 원점이 최소 수십 개(2차원)에서 수백 개(3차원)이상 존재 할 수 있으며, 각 소스에서 최소 십만 개 이상의 입자를 분산하면 연산 시간은 기하급수적으로 증가 한다.

[그림 2]는 입자의 원점의 개수를 달리(1개~20개)하고 각 원점에서 천 개에서 백만 개까지 입자를 분산 했을 때의 결과를 보여 준다.

2. 스캔 방법 ( 제안 방법 )

본 논문에서 제안하는 스캔 방법은 몬테카를로 방법의 단점인 시뮬레이션 연산 시간을 단축하고 몬테카를로 방법과 비슷한 수준의 정확도를 유지 한다.

수치적 계산을 통한 이온 플럭스를 계산하지 않는 이유는 2차원에서는 계산 시간도 많지 않고 결과가 정확하지만 3차원으로의 확장 할 경우 프로파일에 맞추어 입자의 반사등을 고려하여 플럭스를 계산하기 힘들기 때문이다.

제안 방법은 이러한 단점들을 보완하여 입자의 원점에서부터 각 셀을 스캔하고 실제 연산이 필요한 부분을 찾아내 셀의 여러 환경 요인을 고려하여 셀이 받을 수 있는 플럭스 양을 수치적으로 계산한다. 여기에서는 제안 방법을 몇 단계로 나누어 세부적으로 설명 한다.

가. 연산 가능한 셀의 검색

첫 번째 단계는 [그림 3]과 같이 입자의 원점(Source)에서 입자를 분산하여 연산 가능한 셀을 찾는다. 이 때, 몬테카를로 방법과 같이 모든 수치를 얻기 위해 랜덤으로 분산하지 않고 특정한  $\theta$  간격을 유지하고 한 방향으로 분산하여 찾는다.

최적화 된  $\theta$ 는 셀의 크기에 따라 달라질 수 있으며 일반적으로 원점에서 입자를 분산할 때  $\theta$  간격 안에 이산화 된 셀이 검색 될 수 있게 조절 한다. 권장하는 수치는 특정 프로파일의 한 쪽 끝에서 반대편 끝 쪽의 셀

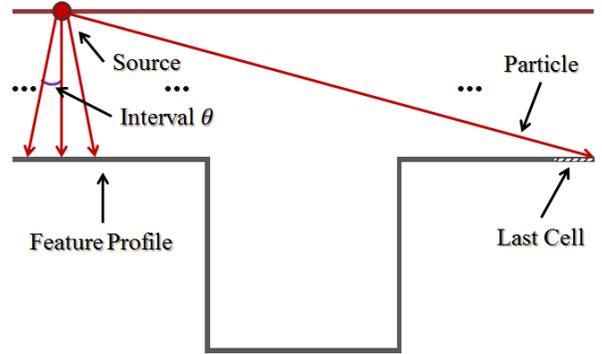


그림 3. 셀의 크기에 따른 Interval  $\theta$  설정  
Fig. 3. Setting Interval  $\theta$  by Cell Size.

이 검색 가능한  $\theta$ 이다.

$$Recommend\theta = LastCell_{max\theta} - LastCell_{min\theta} \quad (1)$$

[식 1]에서와 같이  $\theta$ 를 설정하고 반사대칭 조건을 통하여 시뮬레이션을 하면 마지막  $\theta$ 간격 안에 셀이 검색 되지 않을 수 있다. 이 때, 간격을 재조정하여 보간법을 이용할 수 있으나 큰 차이는 발생하지 않는다.

[그림 4]는 원점에서 표준편차를 바꾸어 입자를 분산한 분포이며 [그림 5]는 평면상에서 보간법을 이용한 상태에서 분포에 따른 영향도를 계산한 결과이다.

결과에서 보듯이 실제 영향을 많이 받는 영역(기준  $\theta$ 간격 안에서 검색되어지는 영역)을 제외한 나머지 영역은 수치상 0에 가깝기 때문에 보간법이 무의미 하며 연산 시간의 지연을 초래할 수 있다.

기준  $\theta$ 가 결정되면  $-90^\circ$  에서  $90^\circ$  사이를  $\theta$ 간격으로 이동하면서 연산 영역을 검색 한다. 검색은 셀의 인덱스만을 찾기 위한 것으로 한 번 검색 되어진 셀에 대

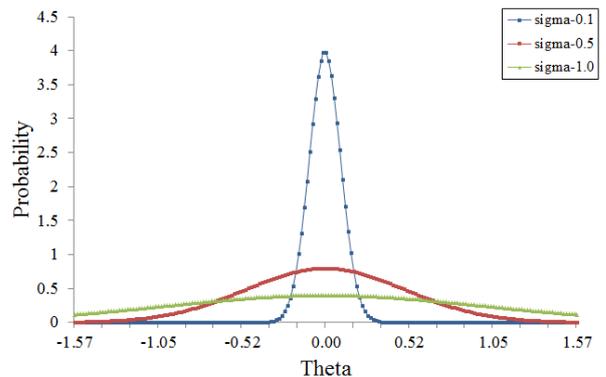


그림 4. 입자의 원점에서의  $\sigma$ 에 따른 분포  
Fig. 4. Probability Density Function depended on  $\sigma$  in Particle Source.

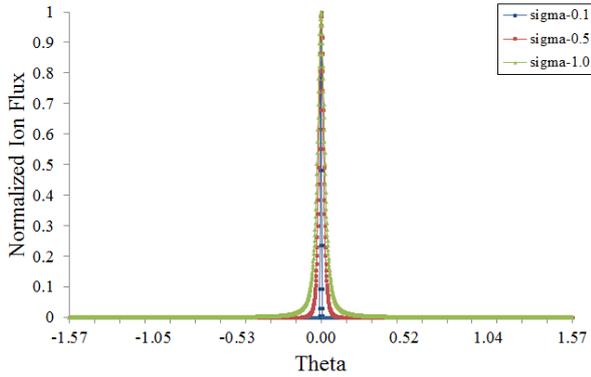


그림 5. 평평한 표면상의  $\sigma$ 에 따른 영향도  
Fig. 5.  $\sigma$  Effectiveness on Flat Surface.

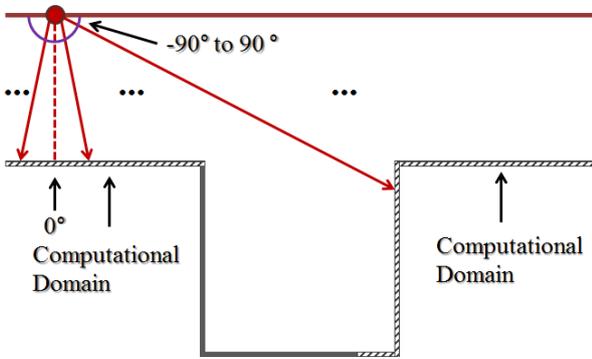


그림 6. 입자의 분포를 통한 셀의 계산 영역 선택  
Fig. 6. Deciding Cell Calculation Area through Particle Distribution.

해서는 그대로 통과한다.

$$C = \{c_i | 0 \leq i \leq N\} \quad (2)$$

$$S = \{s_j | 0 \leq j \leq M\} \quad (3)$$

$$S_{calc_j} = \{c_i | c_i \text{ and } s_j \text{ are visible}\} \quad (4)$$

[식 2]의  $C$ 는 셀을 의미하고 [식 3]의  $S$ 는 입자의 원점을 의미한다. [식 3]은  $j$ 번째 원점  $s_j$ 에서의 계산 영역은  $s_j$ 와 서로 마주보는  $c_i$ 들의 집합을 의미 한다.

#### 나. 입자의 원점과 셀의 관계 정보 추출

두 번째 단계는 [그림 7]과 같이 선택 되어진 각 셀과 입자 원점과의 관계를 통하여 이온 플럭스를 계산하기 위한 기본 정보를 추출한다.

기본 정보는 셀의  $Cell_{min}$ 과  $Cell_{max}$ 의 위치정보와 원점과  $Cell_{min}$ ,  $Cell_{max}$ 가 이루는  $\theta$ 각도  $Cell_{min\theta}$ 와  $Cell_{max\theta}$ 를 포함 한다.

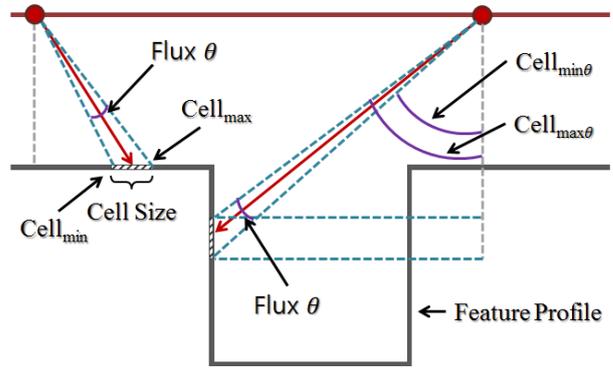


그림 7. 이온 플럭스 계산을 위한 입자의 원점과 셀의 정보 추출  
Fig. 7. Extracting Particle Source and Cell Information for Simulation.

$$flux\theta = |Cell_{max\theta} - Cell_{min\theta}| \quad (5)$$

[식 5]는 플럭스 계산에 큰 영향을 미치는  $flux\theta$ 를 구하는 방법으로  $Cell_{min\theta}$ 와  $Cell_{max\theta}$ 의 차이 값을 이용한다.

#### 다. 세타 영향도를 고려한 플럭스 계산

최종 이온 플럭스는 [식 6]과 같이 입자의 원점에서 셀이 받는 플럭스를 계산하고 해당 셀이 가지는  $flux\theta$ 와  $Total\ Flux$ 의 비율[식 7]을 고려하여 계산 한다.

$$c_{flux_{ij}} = \frac{(c_{flux_{i_{min}}} + c_{flux_{i_{max}}})}{2} \quad (6)$$

$$c_{realflux_{ij}} = c_{flux_{ij}} \times \frac{flux\theta}{Total\ Flux} \quad (7)$$

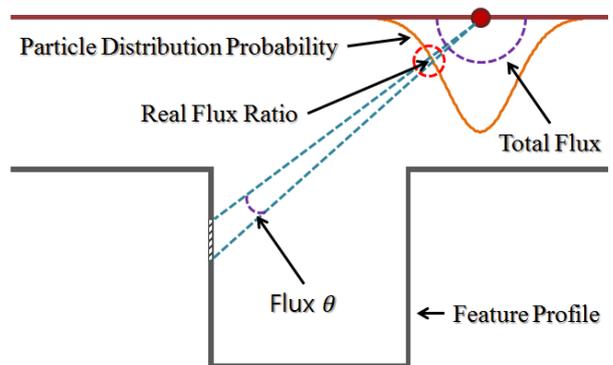


그림 8. 분포 비율과 정보를 이용한 이온 플럭스 계산  
Fig. 8. Calculating Ion Flux using Distribution Ratio and Profile Information.

실제 하나의 입자 원점에서 분산 되어지는 각도는  $-90^\circ$  에서  $90^\circ$  이고 모든 각도에서 분산되어지는 입자의 총 비율을 *Total Flux*라고 할 수 있다.

여기에 각도 마다 서로 다른 분산 확률을 가지기 때문에 이를 고려하여 원점과 셀이 이루는 각도에 의한 확률과 전체 플럭스 중에 셀이 가질 수 있는 비율 *flux $\theta$* 을 이용하여 계산 한다.

### III. 실험

#### 1. 실험 환경

이온 플럭스를 계산하기 위한 실험 환경은 가상 머신 (VMWare)에서 리눅스 플랫폼(Ubuntu 10.1)을 설치하고 진행하였으며 하드웨어 사양은 듀얼코어 CPU 2GHz, 램 1GB로 설정하였다.

실험을 하는데 컴퓨터의 사양과 병렬화 작업의 유무에 따라 측정 시간의 차이는 발생할 수 있지만 이온 플럭스의 계산 결과는 동일하게 얻을 수 있다.

#### 2. 실험 조건

##### 가. 특징 프로파일의 이산화 및 입자의 원점 배치

실험의 조건은 특징 프로파일의 편평한 표면을 0.05 간격(0.05는 특징 프로파일을 시뮬레이션하기 위해 이산화 과정에서 전체 비율에 따른 상대적인 셀 크기 수치)으로 20개씩 이산화 하여 총 100개의 셀을 가지고 총 길이는 5를 갖도록 하였다[그림 9].

또한, 입자의 원점은 특징 프로파일에서 수평한 표면에 존재하는 셀의 개수(총60개)만큼 해당 셀의 상단에 1.0의 거리를 두고 각각 배치하였다.

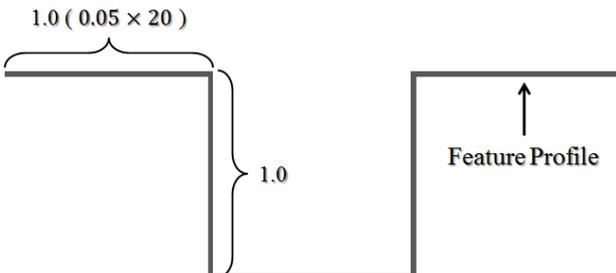


그림 9. 특징 프로파일의 이산화  
Fig. 9. Discretization of Feature Profile.

##### 나. 무 손실 입자의 분산

입자를 분산 할 때 특징 프로파일의 범위를 벗어나는 입자는 손실하게 되며 영향을 미치지 않는다. 반대로 범위 밖에서 도달하는 입자의 영향은 고려한다. 보완을 위해 원점을 늘리면 연산 시간의 증가를 초래 한다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 [그림 10]과 같이 반사대칭 면을 설정하고 시뮬레이션 하였다. 범위 밖으로 나가는 입자를 반대편으로 이동시켜 범위 밖에서 표면으로 들어오는 입자로 인식하도록 하고 표면에 들어오는 입자의 위치에서 원점의 원래 위치를 계산하여 *flux $\theta$* 를 적용했다.

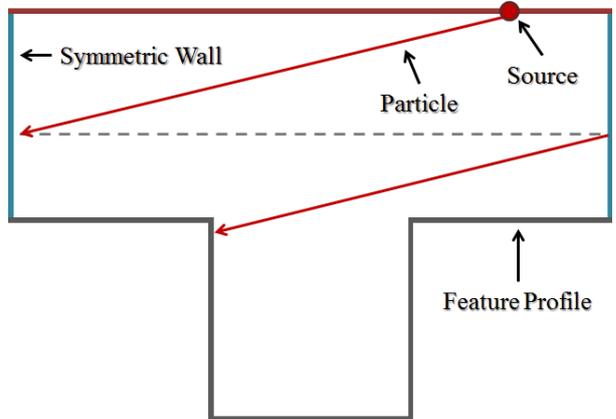


그림 10. 입자의 무 손실을 위한 반사대칭 면  
Fig. 10. Symmetric Wall without Particles Loss.

#### 3. 실험 결과

본 논문의 결과는 가우시안 분포[식 8]과 코사인 분포[식 9]를 이용하여 각각 몬테카를로 방법과 스캔 방법의 결과를 비교 하였다.

$$g(\theta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\sigma^2}\right) \tag{8}$$

$$g(\theta) = \cos^n\theta \tag{9}$$

[그림 11-13]는 가우시안 분포<sup>[9]</sup>를 이용하여 각각  $\sigma$ 의 값이 0.05, 0.1, 0.5일 때 시뮬레이션으로 특징 프로파일 위에서 플럭스를 구한 결과 그래프이고 [그림 14-15]는 코사인 분포를 이용하여 각각  $n$ 의 값이 2, 5 일 때 시뮬레이션을 한 결과 그래프로 몬테카를로 방법과 스캔 방법의 모든 결과가 일치함을 보여준다.

[그림 16] 결과는 몬테카를로 방법을 이용했을 때 입

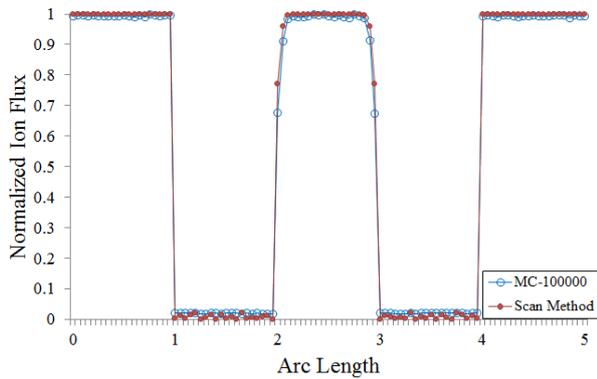


그림 11. 몬테카를로 방법과 스캔방법의 결과 비교 (가우시안 분포  $\sigma = 0.05$ )  
Fig. 11. Scan Method and Monte Carlo method (Gaussian Distribution  $\sigma = 0.05$ ).

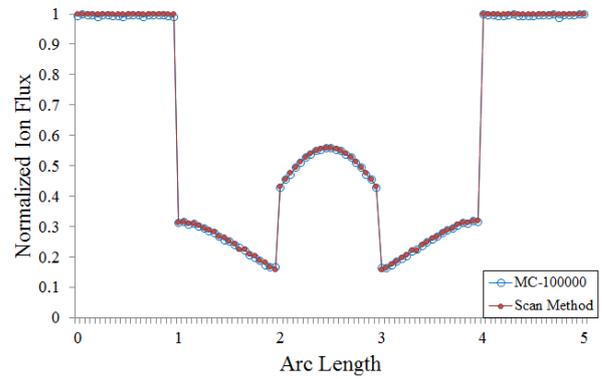


그림 14. 몬테카를로 방법과 스캔방법의 결과 비교 (코사인 분포  $n = 2$ )  
Fig. 14. Scan Method and Monte Carlo method (Cosine Distribution  $n = 2$ ).

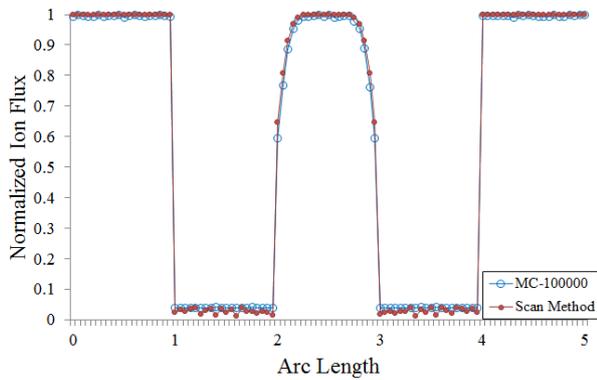


그림 12. 몬테카를로 방법과 스캔방법의 결과 비교 (가우시안 분포  $\sigma = 0.1$ )  
Fig. 12. Scan Method and Monte Carlo method (Gaussian Distribution  $\sigma = 0.1$ ).

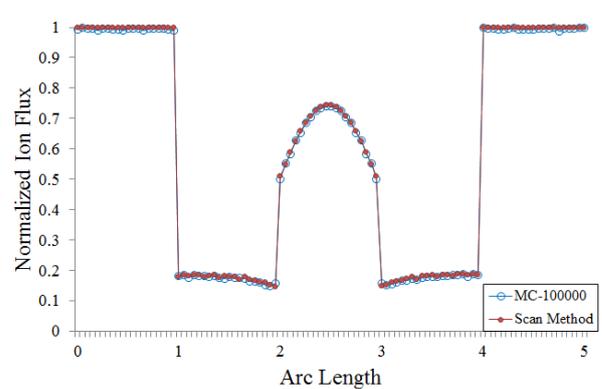


그림 15. 몬테카를로 방법과 스캔방법의 결과 비교 (코사인 분포  $n = 5$ )  
Fig. 15. Scan Method and Monte Carlo method (Cosine Distribution  $n = 5$ ).

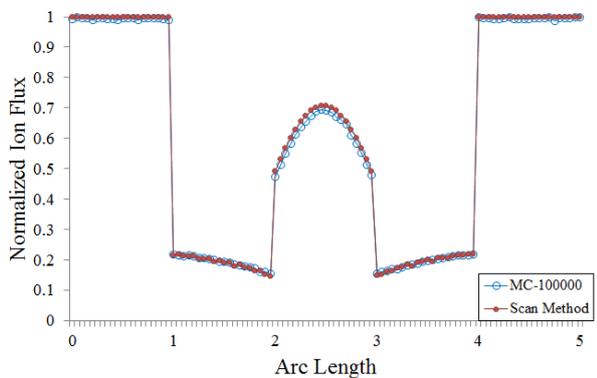


그림 13. 몬테카를로 방법과 스캔방법의 결과 비교 (가우시안 분포  $\sigma = 0.5$ )  
Fig. 13. Scan Method and Monte Carlo method (Gaussian Distribution  $\sigma = 0.5$ ).

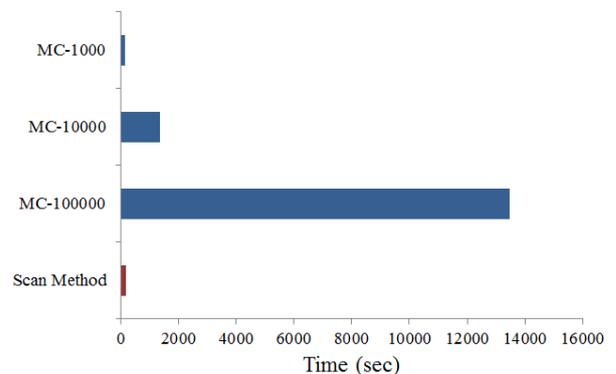


그림 16. 몬테카를로 방법(천 개, 만 개, 십 만개)과 스캔방법의 연산 시간 비교  
Fig. 16. Processing Time of Scan method and Monte Carlo method(1,000 10,000 100,000).

자의 원점에서 분산하는 입자의 개수가 천 개, 만 개, 십만 개 일 때 연산에 필요한 시간과 스캔 방법을 이용했을 때 걸리는 시간을 비교한 그래프이다. 몬테카를로 방법에 비하여 많은 연산 시간을 단축했음을 확인 할 수 있다.

본 논문에서 제안한 방법을 이용했을 때, 몬테카를로 방법을 이용하여 입자의 각 원점에서 십 만개의 입자를 분산 했을 때와 같은 실험 결과(정확도)를 얻을 수 있었으며 실제 연산 시간은 몬테카를로 방법(입자의 원점 당 십 만개)에 대비하여 약 100배 빠른 결과를 보여주었다.

#### IV. 결 론

본 논문은 플라즈마 시뮬레이션 공정 중에 가장 중요한 요소인 식각 공정에서 식각 비율을 계산하기 위한 이온 플럭스 양을 보다 효율적으로 계산하는 방법을 제안했다.

또한 제안한 방법을 가우시안 분포와 코사인 분포를 이용하여 실험한 결과 확률기반의 몬테카를로 방법(입자의 원점 당 십 만개)과 동일하게 정확한 결과를 얻을 수 있고 몬테카를로 방법(입자의 원점 당 십만 개)보다는 약 100배 빠르게 연산 시간을 단축 할 수 있음을 검증하였다.

향후 3차원 상에서 적용을 위한 계산식의 확장과 실험 및 검증이 필요하다.

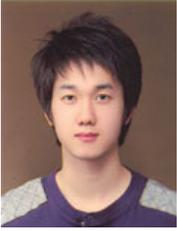
#### REFERENCES

- [1] R. J. Hoekstra, "A model of energy and angular distributions of fluxes to the substrate and resulting surface topology for plasma etching systems," *Doctoral Dissertation*, 1998.
- [2] K.O. Abrokwah, "Characterization and Modeling of Plasma Etch Pattern Dependencies in Integrated Circuits," *Thesis, Massachusetts Institute of Technology*, 2006.
- [3] L. Chen, Q. Wang, and U. Griesmann, "Plasma etching uniformity control for making large and thick dual-focus zone plates," *Microelectronic Engineering*, Vol.88, No.8, pp.2466-2469, August 2011.
- [4] G.Y. Yeom, "Plasma Etching Technology",

*YOUNG*, 2012.

- [5] D. B. Graves and M. J. Kushner, "Influence of Modeling and Simulation on the Maturation of Plasma Technology: Feature Evolution and Reactor Design", *J. Vac. Sci. Technol.* A21, pp.152-156, 2003.
- [6] Y.H. Im, "Surface Reaction Modeling for Plasma Etching of SiO<sub>2</sub> Thin Film", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol.44, No.5, pp.520-527, 2006.
- [7] Y.C. Ban, J.H. Lee, S.H. Yoon, O.S. kwon, Y.T. Kim, and T.Y. Won, "Calculation of Ion Distribution in an RF Plasma Etching System Using Monte Carlo Methods", *Journal of IEEK*, Vol.35, No.5, pp472-480, May 1998.
- [8] A.P. Mahorowala, H.H. Sawin, "Etching of polysilicon in inductively coupled Cl<sub>2</sub> and HBr discharges. III. Photoresist mask faceting, sidewall deposition, and microtrenching", *Journal of Vacuum Science and Technology*, Vol.20, No.3, pp.1077-1083, 2002.
- [9] "Normal distribution", Wikipedia, May 3, 2013 <[https://en.wikipedia.org/wiki/Normal\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution)>

— 저 자 소 개 —



신 성 식(학생회원)  
2006년 전주대학교 컴퓨터공학과  
학사 졸업  
2008년 전북대학교 컴퓨터공학과  
석사 졸업  
2009년 전북대학교 컴퓨터공학과  
박사 수료

<주관심분야 : 소프트웨어 공학, 패턴인식, 시물  
레이션>



유 동 훈(학생회원)  
2004년 충북대학교 전기공학과  
학사 졸업  
2006년 충북대학교 전기공학과  
석사 졸업  
2011년 전북대학교 화학공학과  
박사 수료

<주관심분야 : 반도체, 플라즈마, 시물레이션>



권 오 봉(정회원)  
1980년 고려대학교 전기공학과  
학사 졸업  
1983년 고려대학교 전기공학과  
석사 졸업  
1993년 일본구주대학교 총합이  
공학연구과 박사 졸업

1992년~1993년 일본구주대학교 정보공학과 조수  
1993년~현재 전북대학교 전자정보공학부 교수  
<주관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 사이언티픽 비주  
얼라이제이션>