Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol.52, NO.3, March 2015 http://dx.doi.org/10.5573/ieie.2015.52.3.105
ISSN 2287-5026(Print) / ISSN 2288-159X(Online)

논문 2015-52-3-14

반도체 식각 전산모사에 적합한 플럭스 생성 조건

(A Appropriate Flux Generating Conditions for Semiconductor Etching Simulation)

정 승 한*, 권 오 봉**, 신 성 식***

(Seunghan Jeong, Oubong Gwun©, and Seongsik Shin)

요 약

반도체 식각 전산모사에서는 플라즈마 입자를 생성하는 소스의 모델링이 필요하다. 본 논문에서는 플라즈마 식각 공정에서 사용하는 소스를 확률분포함수로 모델링하고, 몬테칼를로 방법을 이용하여 특정 프로프일의 플럭스를 계산하는 실험을 하였다. 소스의 모델링 파라미터로 소스와 셀 사이의 거리, 소스에서 방사하는 입자수가 있고, 플럭스 계산에 미치는 추가적인 파라미터로 프로파일 상의 셀의 수(셀의 면적)이 있다. 방사하는 입자 분포는 사용하는 소스의 물성에 따라 가우시안 분포와 코사인 분포로 모델링 할 수 있는데, 본 논문은 이들 각각에 대하여 파라미터를 바꿔가며 전산모사를 한 결과를 보인다. 오차율은 가우지안(Incident Flux)과 코사인분포(Incident Neutral Flux)에서 모두 입자 수의 증가에 따라 상당부분 감소하였으나 처리시간은 이보다 더 증가하였다. 셀수와 거리의 증가는 오차율을 약간 증가시켰고 처리시간도 증가시켰다. 본 논문의 실험 결과를 통해 처리 시간을 고려하여 적합한 플럭스의 계산을 유추할 수 있다.

Abstract

In semiconductor etching simulation, The source modeling for generating plasma species is required. In this paper, we modeled the source of plasma etching process with probability distribution and the feature profile with simple geometry objects, then got the flux on the feature profile. The distance between the source and the cell on the modeling parameters of the source, there are a number of particles to be emitted from a source, there is a number (area of the cell) of the cell on the profile with additional parameters to give the calculation of flux. The flux error ratio on both gaussian(Incident Flux) and cosine probability distribution(Incident Neutral Flux) is much decreased as the number of ray is increased but the processing time is more increased than that. The increase of the number of cell and distance makes increase the flux error ratio and the processing time moderately. In view of the processing time through the experimental results in this paper, it is possible to analogize the calculation of appropriate fluxes.

Keywords : 플라즈마 식각, 전산모사, 플럭스, 소스 모델링, 몬테카를로

* 학생회원, 전북대학교 컴퓨터공학부
(Division of Electronics & Information Engineering, Chonbuk National University)
** 정회원, 전북대학교 컴퓨터공학부, IT융합연구센터
(IT Convergence Research Center, Division of Computer Science & Engineering, Chonbuk National University)
*** 학생회원, 경원테크
(KyoungWon Tech Co.)
©Corresponding Author(E-mail: obgwun@jbnu.ac.kr)
※ 이 논문은 기본연구지원사업으로 한국연구재단의 지원을 받음(2012-1301002660, 전북대학교)
※ 이 논문은 한국연구재단 BK21 플러스 사업의 지원을 받음.
Received ; December 10, 2014 Revised ; February 24, 2015 Accepted ; March 4, 2015

Ⅰ. 서 론

플라즈마 전산모사는 핵융합이나 우주 플라즈마 과학 등 실제 물리적으로 실험할 수 없는 분야에서 사용된다. 특히 국제간 과열 경쟁 상태에 있는 반도체 산업에서도 설계와 생산시간의 단축을 위하여 공정 플라즈마를 위한 다차원적인 전산모사가 사용된다[1].

반도체 공정 중 하나인 식각공정(Etching)은 웨이퍼상에 증착된 막을 선택적으로 제거해 회로패턴을 만드는 것으로 플라즈마(Plasma)를 이용한다. 플라즈마(Plasma)는 초고온 상태에서 원자가 해리되어 음전하를 가진 전자와 양전하를 띤 이온으로 분리 된 제 4의 물질 상태로, 많은 수의 자유전자, 이온 및 중성의 원자 또는 분자로 구성된다.

플라즈마는 초고온 상태에서만이 아니라 충분한 크기의 자기장이 기체에 가해질 때 즉, 자기장으로 가속된 높은 에너지의 자유전자가 중성의 원자나 분자와 충돌하여 이온화 할 때도 발생한다. 이 때 이온화에 의해 생성된 추가 전자도 연쇄 반응 (Avalanche)에 의해 또 다른 이온화를 일으키면서 이온의 수가 기하급수적으로 늘어나게 되는데, 이 상태를 플라즈마 상태라고 한다[2].

플라즈마 식각에 관여하는 요소는 이온(Ion)종과 중성(Neutral)종으로 이온종은 웨이퍼에 충격을 가하여 입자를 튀어나오게 하여 깎아내는 스퍼터링 역할을 하고 중성종은 화학반응을 촉진하는 역할을 하는데 물리적인 성질이 다르다. 이온종[그림 4]는 수직으로 진행하여 비등방성(anisotropic) 식각을 하며 중성종[그림 6]은 방사 진행하여 등방성(isotropic) 식각을 한다[3].

초고집적회로를 만드는 식각 공정은 나노미터 단위 선폭으로 정밀한 작업을 함으로 많은 시간과 투자비용이 소요된다. 이 때문에 흔히 전산모사를 이용하여 필요한 파라미터를 미리 구한 후에 공정작업을 한다. 레벨셋을 이용한 반도체 식각공정 전산모사에서 프로파일상의 한 점 x가 소스에서 받는 플럭스는 [식 1]로 기술된다[4].

$$F = \int_{source} Flux(r,\psi,\gamma,\theta,x)\Upsilon(x,x')(\vec{n}\cdot\vec{\alpha})dx' \quad (1)$$

여기서 Flux()는 소스 x'에서 프로파일상의 한 점 x.로 방사하는 플럭스로 거리(r)과 방사각(ψ,γ,θ)의 함수이다. 소스의 플럭스 분포는 플라즈마의 종류에 따라 다른 각 분포를 가져 일반적으로 식각 전산모사에서 이온종은 매우 작은 표준편차를 갖는 가우지안 분포의 확률밀도함수로 중성종은 코사인 분포의 확률분포 함수로 모델링한다[5].

몬테카를로 방법으로 식각공정을 전산모사 할 경우 시간, 비용 등의 제약으로 소스에서 나오는 입자(이하 입자) 수가 한정된다. 그런데 몬테카를로 전산모사의 정확도는 입자수 즉 시행(trial 또는 history)의 횟수, 소스와 프로파일까지의 거리, 프로파일 상의 셀수 등의 파라미터와 관계가 있으므로 효율적인 전산모사를 위해서는 이러한 파라미터와 전산모사의 정확도와의 관계를 알아야 한다.

본 논문에서는 몬테카를로 방법 즉 입자가 확률분포 함수에 따라 랜덤하게 소스에서 나온다고 가정하고 소스에서 프로파일까지 거리, 셀 면적(셀 수), 소스의 입자 수를 파라미터로 하여 프로파일 상의 플럭스를 측정하여 소스에서 나오는 입자의 수가 100만 개인 이상적인 것과 비교하였다. 그리고 이러한 파라미터의 변화가 프로파일의 플럭스 변화에 어떤 영향을 미치는지 파악하여 장래 몬테카를로를 이용한 식각 시뮬입자션에서 이용할 수 있게 하였다.

본 논문은 Ⅴ장의 구성으로 Ⅱ 장에서는 전산모사모델에 대하여 기술하고, Ⅲ 장에서는 플럭스계산환경에 대하여 논하고, 이어서 Ⅳ 장에서는 실험 결과를 보이고 고찰하며 마지막으로 Ⅴ 장에서 결론을 내린다.

Ⅱ. 전산모사 모델

1. 식각 공정 전산모사 모델

반도체 식각은 특히 메모리인 경우 동일 패턴이 반복되므로[6] 모든 영역을 동시에 전산모사 하는 것보다 일부 영역을 선택하여 계산하면 빨리 결과를 얻을 수 있다.

본 논문의 식각 공정 전산모사는 [그림 1]의 왼쪽 그림과 같이 식각 공정의 한 영역을 전산모사 영역으로 설정하고 홈 모양의 해당영역 형상 정보를 2차원으로 뽑아 프로파일(Feature Profile)을 생성한다. 그리고 [그림 1]의 오른쪽 그림과 같이 프로파일 위에 거리를 두고 소스 영역을 만들어 소스로 부터 입자를 가우지안분포 또는 코사인 분포에 따라 랜덤하게 발생시켜 프로파일에 쏘아 프로파일 상에 축적되는 플럭스를 측정하여 파라미터가 어떤 영향을 미치는지 조사한다. 플럭스는

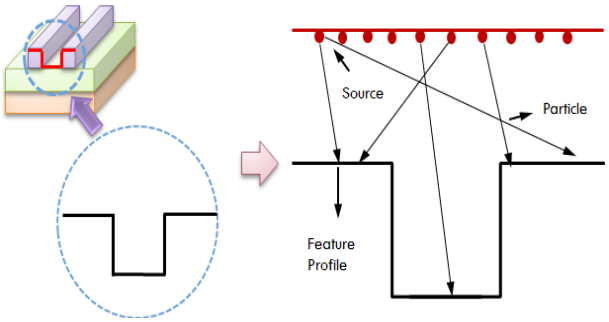

그림 1. 식각 공정 전산모사 한 영역 설정
Fig. 1. Setting of the etching process computerization replicate areas.

실제 식각을 하는 비율을 나타내지는 않으나 식각 비율을 계산하는데 중요하게 사용 된다[7].

2. 몬테카를로 방법 및 분포 함수

몬테카를로 방법은 수식으로 계산이 어려울 때 사용하는 방법으로 난수를 반복 발생시켜 확률적 방법으로 계산한다. 플라즈마의 발생 분포 즉 플라즈마의 진행 방향 및 크기는 이온종, 중성종 등 플라즈마 종에 따라 다르나 확률분포함수의 파라미터를 조정하여 분포함수로 모델링 할 수 있다. 확률분포함수는 확률변수가 임의의 확률 값(0~1)을 갖는 함수인데 여기서 확률변수는 플라즈마 소스 면의 법선과 입자가 진행하는 선 사이의 사이각을 말한다. 난수를 이용하여 분포 함수를 생성할 때 고려할 점은 난수로 전산모사 한 확률분포가 수식으로 계산한 것과 얼마나 일치하느냐 이다.

[그림 2]은 난수의 개수가 오차에 미치는 영향을 알아보기 위해 난수의 개수를 각각 1,000개, 10,000개, 100,000개, 1,000,000개로 코사인 확률밀도함수와 수식으

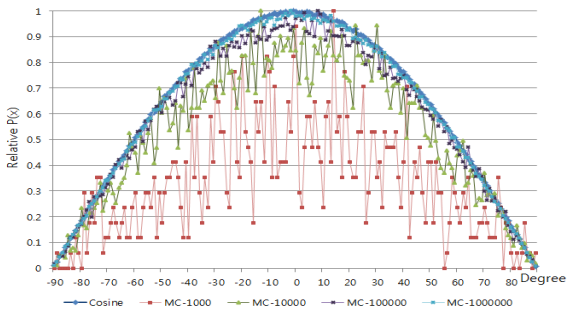

그림 2. 몬테카를로 시뮬입자션의 횟수 증가에 따른 정확도 비교
Fig. 2. Accuracy Comparison of the increase in the number of Monte Carlo simulations.

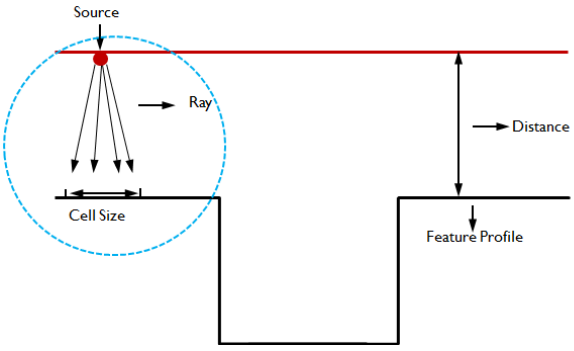

그림 3. 몬테카를로를 이용하여 한 영역을 전산모사
Fig. 3. Simulation of an area using a Monte-Carlo.

로 계산한 것을 비교 한 그래프이다. 몬테카를로의 난수 발생 횟수가 많을수록 수식으로 계산한 코사인 확률밀도 함수와의 오차가 줄어드는 것을 알 수 있다.

식각 시뮬입자션에서도 [그림 3]의 원부분에서와 같이 소스에서 발생하는 입자 수를 증가시킴으로써 분포함수의 정확도를 높일 수 있다. 즉 입자의 수, 즉 난수를 증가시키면 고른 분포함수를 얻을 수 있다[8].

가우시안 분포는 정규분포라고도 말하며 자연계에서 수집된 자료를 모델링 하는데 자주 사용된다. [식 2]는 가우시안 분포의 확률밀도함수이다[8].

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} exp(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}) \qquad (2)$$

여기서 μ는 평균, σ는 표준편차를 의미한다. 가우시안 분포는 표준편차에 따라 형태가 달라지는데 표준편차가 작을수록 랜덤변수의 폭이 좁아지고 평균의 확률값이 커지며 랜덤변수가 평균주위에 모인다. 이온종은 [그림 4]와 같이 소스에서 폭이 좁게 퍼져 프로파일로 진행하므로 가우지안 분포로 모델링 한다.

[그림 5]는 표준편차에 따라 가우지안 확률밀도 함수

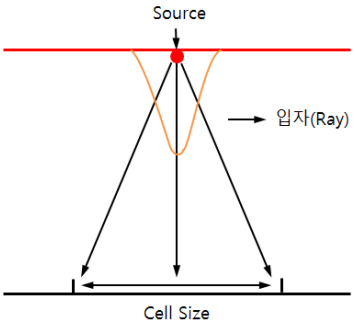

그림 4. 이온종 : 가우지안 분포
Fig. 4. Ion species: Gaussian Distribution.

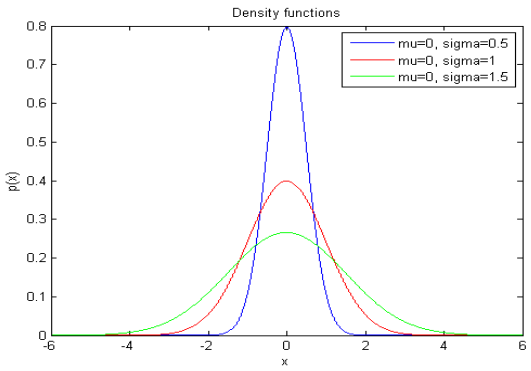

그림 5. 표준편차에 따른 가우시안 분포 확률밀도 함수
Fig. 5. Gaussian probability density function in accordance with the standard deviation.

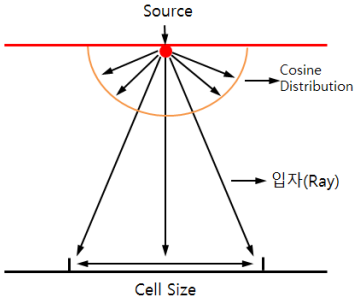

그림 6. 중성 종: 코사인 분포
Fig. 6. Neutral species: Cosine Distribution.

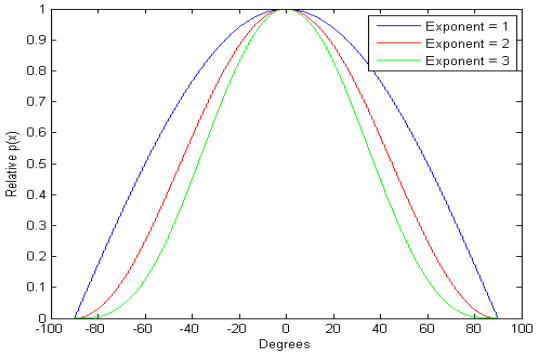

그림 7. 지수에 따른 코사인 분포 확률밀도 함수
Fig. 7. Cosine distribution probability density function according to the index.

의 형태가 달라지는 것을 그림으로 나타낸 것이다. 평균을 0으로 하고 표준편차를 0.5, 1.0, 1.5로 변화시켰다. 표준편차를 줄이면 함수의 값이 평균값 주위로 모여 이를 아주 작게 하면 수직으로 진행하는 1개의 입자도 전산모사 할 수 있음을 알 수 있다.

중성종은 [그림 6]과 같이 소스에서 나오는 입자가 웨이퍼 상으로 방사상으로 진행하기 때문에 코사인 분포를 이용하여 전산모사한다.

코사인 분포의 확률밀도함수는 [식 3]으로 표현되며 상대확율값으로 그리면 [그림 7] 모양의 그래프가 된다[9].

$$f(x) = (\frac{1+\cos(x)}{2\pi})^n \quad -90 < x < 90,\ n\text{:자연수} \quad (3)$$

여기서 x는 확률변수로 소스의 법선과 입자 진행방향과의 사이각이다. n은 지수로 이온종에 따라 조율된다. [그림 7]은 식 2의 지수 n를 1~3차까지 변화시킨 형태이다. 지수가 커질수록 가운데가 볼록해져 지수를 크게 하면 이온종도 전산모사할 수 있다.

Ⅲ. 몬테카를로 방법을 이용한 플럭스 계산

본 논문에서는 몬테카를로 방법으로 특징 프로파일 위에서 플럭스를 얻기 위하여 [그림 8]와 같이 프로파일의 5개 면을 이산화하고, 입자의 소스를 [그림 9]과 같이 상단에 배치한다. 그리고 프로파일의 한 평면을 0.05~0.0125 간격으로 20~80 개씩 이산화 하여 총 100~400개의 셀을 갖도록 한다. 또한 [그림 9]와 같이 소스는 프로파일에서 수평한 표면상에 존재하는 셀의 개수 60~240개만큼 해당 셀에서 0.5~1.5의 거리를 두고 각각 배치하였다.

소스 수는 셀 수 이하 또는 그 이상으로 만들 수 있으나 소스 수를 변경하여 입자 발생 실험을 해본 결과 각 셀마다 그 셀 위의 소스에서 발생한 입자가 해당 셀의 플럭스에 가장 많은 영향을 미치기 때문에 셀의 수와 동일하게 소스 수를 만들고 입자를 발생시켰다. 또 물리적으로도 많은 플라즈마 소스를 만들 수 없다는 것도 고려하였다.

그리고 [그림 9]와 같이 소스에서 셀 방향으로 입자

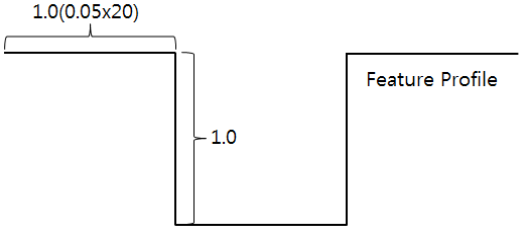

그림 8. 특징 프로파일(표면형상)의 이산화
Fig. 8. Features profile dioxide (surface profile).

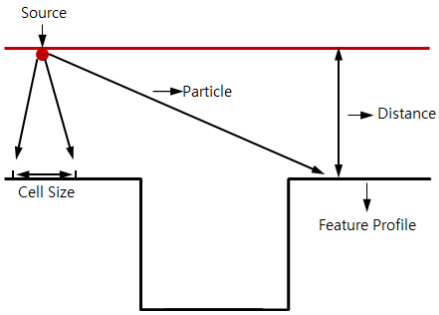

그림 9. 플럭스 계산을 위한 기본 환경
Fig. 9. The default setting for the flux calculation.

를 가우시안 분포 또는 코사인 분포를 갖도록 발생시켜 소스에서 셀까지의 거리, 면당 셀 수, 총 입자수가 프로파일에 어떤 영향을 미치는가에 대해 관찰한다.

1. 소스에서 셀까지의 거리

[식 1]이 보이듯이 소스에서 나오는 플럭스 즉 $Flux(r,\psi,\gamma,\theta,x)$는 소스의 방향$(\psi,\gamma,\theta)$과 소스에서 셀까지의 거리$(r)$의 함수이다. M. J. Hartig 등 연구에서 알 수 있듯이 소스에서 셀까지의 거리가 멀어지면 셀이 받는 플럭스의 양은 적어지는 경향이 있다[10]. 이러한 영향을 알아 보기위해 [그림 10]과 같이 환경을 구축하였다. 셀 사이즈, 소스의 수 등 플럭스 변화에 영향을 미치는 다른 조건들은 고정시키고 거리를 0.5, 1.0, 1.5로 변화시켜 각각의 변화가 실제로 플럭스 분포에 어떻게 미치는지 조사하였다.

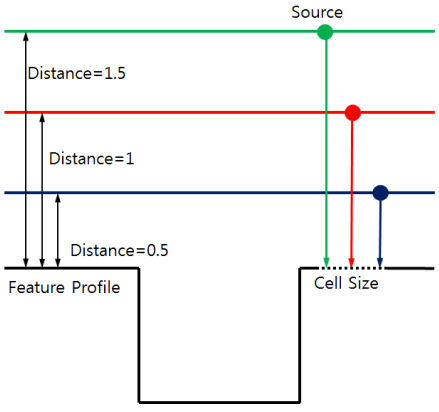

그림 10. 거리에 따른 플럭스 환경
Fig. 10. Flux environment according to distance.

2. 셀과 소스의 위치

프로파일의 이산화의 크기를 정하기 전 셀과 소스의 위치가 플럭스에 미치는 영향을 알아본다. 본 논문은 셀을 바라보고 있는 소스의 위치는 1:1 비율로 셀의 정중앙에 위치하고 있다[그림 11]. 이것은 [그림 11]의 왼쪽과 같이 소스의 위치가 셀과 셀 사이이거나 여러 셀들의 사이에 있을 경우, 입자가 발생할 경우에 정확한 플럭스의 계산이 어렵게 되고, 입자에서 발생되는 영향이 직진성으로 될 경우가 크기 때문에(편차의 영향) 한 셀에서 영향을 미치는 플럭스의 양을 계산하기 어렵게 된다. 본 논문은 하나의 셀에서 쌓이는 플럭스를 축적하여 전체 플럭스의 양을 계산하는 것이기 때문에 셀과 소스의 위치 관계는 [그림 11]의 오른쪽과 같은 형태로 1:1 비율로 정해주어야 한다.

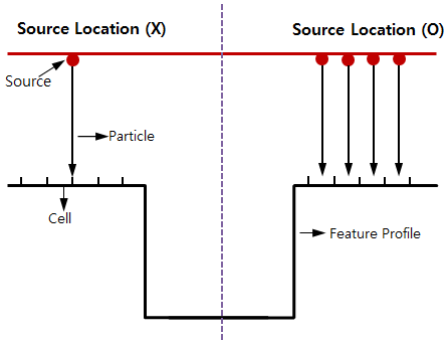

그림 11. 셀과 소스의 위치 관계
Fig. 11. Positional relationship between the cell and the source.

3. 셀 수

프로파일의 이산화의 크기 즉 셀 사이즈의 크기가 프로파일 위에 축적되는 플럭스에 미치는 영향을 알아본다. 셀 사이즈는 특징 프로파일의 한 면을 세분화한 것으로 셀 수 n과 셀 사이즈 s의 관계식은 다음과 같다.

$$n = \frac{1}{s}$$

즉 셀 사이즈 s가 증가하면 셀 수 n은 감소한다. 예를 들면 s가 0.05이면 n은 20이 된다.

[그림 12]는 셀 사이즈에 따라 특징 프로파일 위에 있는 셀의 수가 달라지는 것을 보인다. 셀 단위로 계산이 이루어지고 또 소스에서 셀 까지 닿는 것이 거의 직진의 형태로 이루어져 셀 위의 소스에서 나온 입자가 바로 그 아래 셀로 들어가기 때문에 셀 사이즈가 클수록 한 셀에서 받아들이는 양이 많아져 소스에서 나오는

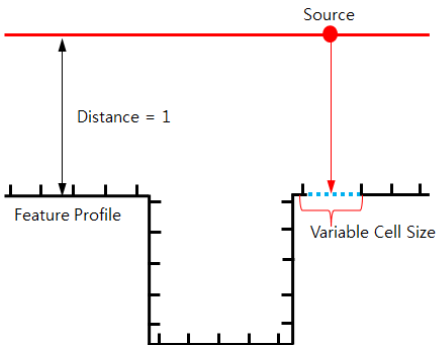

그림 12. 셀 사이즈에 따른 플럭스 환경
Fig. 12. Flux environment according to the cell size

입자 수가 많지 않을 경우 프로파일 상의 플럭스 분포가 부드럽지 못하고 거친 모양으로 나타나게 된다.

셀 수가 많아지는 것은 소스 수도 많아지므로 어떤 소스에서 나오는 입자가 이웃 입자와 겹치지 않을 경우 정밀한 플럭스 분포를 얻을 수 있으나 연산 속도가 줄어들게 되는 단점이 있다.

4. 입자 수에 따른 오차율 계산

본 연구방법은 일반적인 몬테카를로 방법과 같이 시행 횟수가 많아질수록 정확한 결과를 얻을 수 있어 입자의 수가 많아지면 면당 셀 수 및 거리에 관계없이 정확한 결과를 얻을 수 있다. 본 실험에서는 입자 수 100만 개, 거리 1, 해당 프로파일의 면당 셀 수 20개로 전산모사 한 것을 해당 실험의 셀 당 플럭스 분포로 변환하여 오차율을 계산하는 기준으로 삼았다. [그림 13]은 가우지안 분포의 기준 데이터를 그래프로 그린 것이다.

[식 4]는 1,000~100,000 입자에 대한 플럭스 분포를 1,000,000의 기준 플럭스 분포와 비교하여 평균 오차율을 %로 구하는 식이다.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{|N_i - M_i|}{N_i}}{n} \times 100 \quad (4)$$

여기서 E는 평균 오차율, n은 셀 수, N_i 는 기준이 되는 플럭스 분포의 i번째 셀의 플럭스 값, M_i 는 해당 실험 플럭스 분포의 i번째 셀의 플럭스 값이다.

해당 실험의 플럭스 분포의 셀 수와 기준이 되는 플럭스 분포의 셀 수가 다를 경우에는 기준이 되는 플럭스 분포의 셀 수를 해당 실험의 플럭스 분포 셀 수로 바꾸고 셀 당 플럭스를 계산하였다.

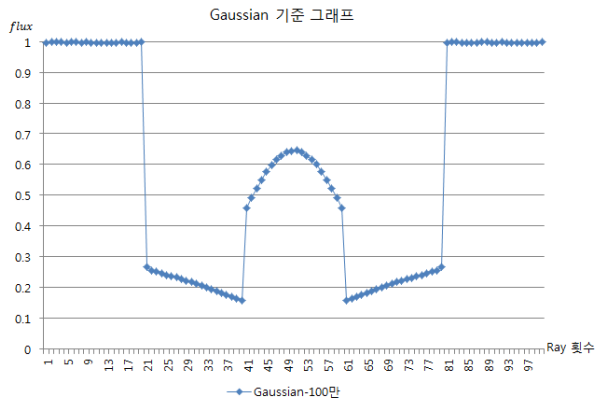

그림 13. 가우지안 분포 기준 그래프: 입자 수 100만
Fig. 13. Gaussian distribution based on the graph: the 100 million particles.

Ⅳ. 실험 및 평가

여기에서는 가우지안 분포와 코사인 분포에 대하여 Ⅲ장에서 고안한 방법으로 실험 한 데이터를 보이고 고찰 한다.

난수의 개수가 전산모사의 정확도에 미치는 영향을 조사하기 위하여 기준 데이터를 획득 한 것과 같은 조건에서 가우지안 분포에 대하여 입자를 1,000번에서 100,000 번 생성 한 데이터를 조사하였는데 그림 [그림 14]에서와 같이 오차율은 1,000번에서 10,000번까지 구간에서 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이 때문에 이 구간에서 실험을 하고 결과를 분석하였다. 이 선택의 또 다른 이유는 완전한 식각 전산모사에서 면이 깎이는 속도는 면에 축적되는 플럭스 계산 이외의 가시성(visibility)판정 등의 추가 계산이 필요하므로 적은 수의 입자로 전산모사를 하는 것이 바람직하기 때문이다.

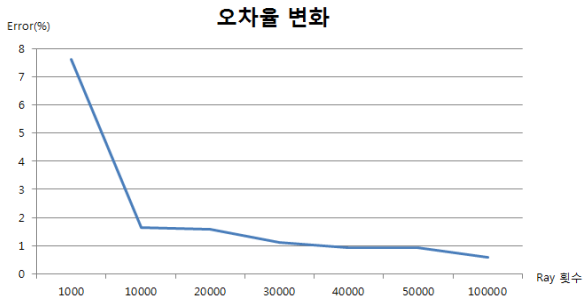

그림 14. 1,000~100,000 구간의 오차율 변화
Fig. 14. Error rate change in the interval 1,000 to 100,000.

1. 가우지안 분포

[표 1]에 표준편차 0.5의 가우지안 분포에 대하여 거리, 면당 셀 수, 입자 수 변화에 따른 플럭스 오차율과 처리시간을 표시하였다. 오차율은 입자수, 거리, 셀수 순으로 영향을 받으나 거리와 셀수는 입자수에 비하여 그 영향이 미미하다. 입자수가 10배 증가함에 따라 오차율은 수배증가하고 거리와 셀수가 수배 증가함에 따라 오차율이 최대 소수점 한 자리수 단위로 증가한다. 구체적인 내용은 다음과 같다.

가. 입자수에 따른 오차율

모든 실험에서 입자수의 증가는 오차율을 감소시키고 처리시간을 증가시켰다. 입자수의 증가가 오차율과 시간에 미치는 영향을 알아보기 위하여 거리 1, 2, 3과 셀수 20, 40, 80에 대하여 입자수가 1,000 개에서 10,000 개로 증가할 때 오차율의 감소비와 시간 증가비를 [표 2]로 작성하였다. 이 구간에서 오차율은 3.6~4.1 배로

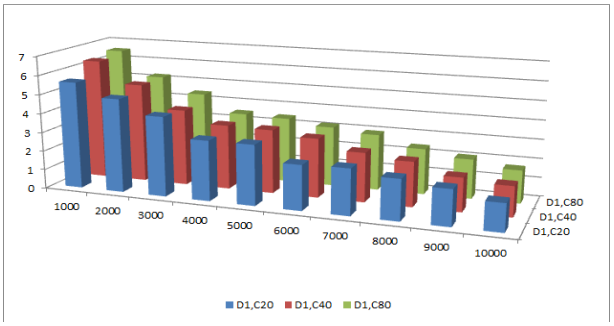

그림 15. 입자 수에 따른 오차율(거리 1, 셀수: 20, 40, 80)
Fig. 15. Error rate according to the number of particles (the distance 1, number of cells: 20, 40, 80).

표 1. 파라미터에 변화에 대한 플럭스 % 오차율(가우지안 분포)
Table 1. Flux% error rate to changes in parameters (Gaussian distribution).

오차율(%), 시간(초)

입자 수(1000)			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D1*	C20**	오차율	5.62	4.92	4.18	3.15	3.15	2.35	2.40	2.12	1.86	1.44
		시간	195	336	528	741	1,063	1,422	1,856	2,235	2,757	3,263
	C40[2)]	오차율	6.34	5.21	4.01	3.39	3.34	3.10	2.58	2.34	1.77	1.58
		시간	501	956	1,392	1,816	2,266	2,672	3,316	4,042	4,461	4,681
	C80[2)]	오차율	6.54	5.22	4.42	3.50	3.43	3.15	2.94	2.40	2.07	1.72
		시간	1,011	1,314	1,796	2,533	3,025	3,573	4,375	5,006	5,636	6,322
D2[1)]	C20	오차율	6.38	5.17	4.21	3.29	3.09	2.62	2.51	2.29	1.94	1.56
		시간	237	356	555	817	1,103	1,498	1,871	2,282	2,823	3,401
	C40	오차율	6.59	5.52	4.00	3.57	2.74	2.70	2.28	2.13	2.10	1.78
		시간	872	1,332	1,905	2,341	2,852	3,463	3,955	4,629	5,005	5,399
	C80	오차율	6.62	5.58	4.15	3.72	2.99	2.93	2.42	2.12	2.31	1.82
		시간	1,112	1,485	1,176	2,586	3,194	3,874	4,457	5,295	5,781	6,481
D3[1)]	C20	오차율	6.89	5.11	4.44	3.81	3.60	2.74	2.71	2.33	2.02	1.78
		시간	496	623	883	1,138	1,416	1,754	2,123	2,770	3,203	3,792
	C40	오차율	6.94	5.92	4.81	3.99	3.44	2.81	2.74	2.42	2.11	1.79
		시간	1,082	1,462	2,199	2,797	3,501	4,041	4,512	5,052	5,352	5,771
	C80	오차율	7.74	6.10	5.12	4.09	3.51	2.99	2.93	2.49	2.27	2.00
		시간	1,460	2,127	2,821	3,393	4,123	4,753	5,556	6,526	7,221	8,256

표 2. 입자수 1000과 10,000의 오차율 비와 처리시간 비(가우지안 분포)
Table 2. 1000 and 10,000 rate of the particles and the processing time ratio (Gaussian distribution).

D1						D2						D3					
C20		C40		C80		C20		C40		C80		C20		C40		C80	
E***	T[3)]	E	T	E	T	E	T	E	T	E	T	E	T	E	T	E	T
3.9	16.7	4.0	9.3	3.8	6.3	4.1	14.4	3.7	6.2	3.6	5.8	3.9	7.7	3.9	5.3	3.9	5.7

* D1: 거리 1, D2: 거리 2, D3: 거리 3. D: 프로파일의 셀과 셀이 바라보는 소스와의 실제 거리
** C20: 셀수 20, C40: 셀수 40, C80: 셀수 80. C : 프로파일의 한 면에서 나누어지는 셀의 수
*** E: 에러율, T: 처리시간

표 3. 입자수 1000과 10,000의 거리에 따른 오차율 비와 처리시간 비(가우지안 분포)
Table 3. Error rates depending on the distance of the particle number 1000 and 10,000 non-processing time ratio (Gaussian distribution).

입자수 1000						입자수 10,000					
C20(D1:D2:D3)		C40(D1:D2:D3)		C80(D1:D2:D3)		C20(D1:D2:D3)		C40(D1:D2:D3)		C80(D1:D2:D3)	
오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비
1:1.1: 1.2	1:1.2: 2.5	1:1:1.1	1:1.7: 2.2	1:1:1.2	1:1.1: 1.4	1:1.1: 1.2	1:1:1.2	1:1.1: 1.1	1:1.2: 1.2	1:1.1: 1.2	1:1:1.3

표 4. 입자수 1000과 10,000의 셀수에 따른 오차율비와 처리시간비(가우지안 분포)
Table 4. Error rate according to the number of cells in a particle number 1000 and 10,000 processing time ratio (Gaussian distribution).

입자수 1000						입자수 10,000					
D1(c20:c40:c80)		D2(c20:c40:c80)		D3(c20:c40:c80)		D1(c20:c40:c80)		D2(c20:c40:c80)		D3(c20:c40:c80)	
오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비
1:1.1: 1.2	1:2.6: 5.2	1:1:1	1:3.7: 4.7	1:1:1.1	1:2.2: 2.9	1:1:1.2	1:1.4: 1.9	1:1.1: 1.2	1:1.6: 1.9	1:1:1.1	1:1.5: 2.2

감소하고 시간은 5.3~16.7 배 증가하였다. 오차율의 감소는 시간 증가율에 훨씬 미치지 못했다. [그림 15]는 입자수가 1000에서 10,000으로 증가할 때 오차율이 감소하는 것을 보이기 위하여 그린 것으로 거리 1, 면당 셀 수 20, 40, 80에 대한 것이다. 다른 것들도 유사한 경향을 보인다.

나. 거리에 따른 오차율

거리의 증가에 따른 오차율의 증가폭을 알아보기 위하여 입자수 1000과 10,000에 대하여 거리 1, 2, 3 에 따른 에러율과 처리 시간비를 측정하였다. [표 3]은 이를 보인다. 거리 1, 2, 3에 대한 오차율비는 1.0: 1.0: 1.1~1.0: 1.1: 1.2 범위에, 처리 시간비는 1.0: 1.0: 1.2~1.0: 1.2: 2.5 범위에 속하였다. 거리에 따른 오차율 비는 모든 경우 거의 일정하였으나 처리 시간비는 입자수와 셀수가 작을 때에 크게 발생하였다. 거리의 증가는 오차율을 조금 증가시켰으나 입자수가 증가함에 따라 이 경향은 작아졌다.

다. 셀수에 따른 오차율

셀수의 증가에 따른 오차율의 증가폭을 알아보기 위하여 입자수 1,000과 10,000, 거리 1, 2, 3에 대하여 면당 셀 수 20, 40, 80의 오차율 비와 처리 시간비를 측정하여 [표 4]를 작성하였다. 오차율비는 1.0: 1.0: 1.0~1.0: 1.1: 1.2 범위에, 시간비는 1.0: 1.4: 1.9~1: 2.6: 5.2 범위에 속하였다. 셀수가 증가하면 오차율이 약간 증가하였다. 셀수가 증가하면 오차율이 감소하리가 생각 할 수 있으나 여기에서는 표준편차가 고정되어있어 한 입자가 영향을 미치는 영역이 넓어지기 때문에 나타나는 현상이라 생각된다.

2. 코사인 분포

[표 5]에 지수 1의 코사인 분포에 대하여 거리, 셀사이즈, 입자수 변화에 따른 플럭스 오차율을 표시하였다. 가우지안 분포와 같이 입자수, 거리, 셀수 순으로 영향을 받으나 거리와 셀수는 입자수에 비하여 영향이 미미하다. 셀 수와 거리가 증가하면 오차율도 증가한다. 구체적인 내용은 다음과 같다.

가. 입자수에 따른 오차율

가우지안 분포와 같이 모든 실험에서 입자수의 증가는 오차율을 감소시키고 처리시간을 증가시켰다. 입자수의 증가가 오차율과 시간에 미치는 영향을 알아보기 위하여 거리 1, 2, 3과 셀 수 20, 40, 80에 대하여 입자수가 1000 개에서 10,000 개로 증가할 때 오차율의 감소비와 시간 증가비를 계산하여 [표 6]을 작성하였다. 이 구간에서 입자수가 1,000배 증가할 때 오차율은 3.5~5.9 배로 감소하고 시간은 4.8~15.2 배 증가하였다. 오차율의 감소는 시간 증가율에 훨씬 미치지 못했다.

표 5. 파라미터에 변화에 대한 플럭스 % 오차율(코사인)
Table 5. Flux% error rate for the change in the parameter (cosine).

오차율(%), 시간(초)

입자 수(1000)			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D1*	C20**	오차율	10.04	10.21	8.03	7.39	5.74	5.10	3.58	2.54	1.97	1.70
		시간‡	222	421	672	897	1,140	1,485	1,932	2,327	2,765	3,375
	C40[5]	오차율	10.55	10.27	8.95	8.69	6.88	6.10	5.00	3.53	3.10	2.02
		시간	533	1,007	1,459	1,826	2,298	2,672	3,372	4,052	4,512	4,738
	C80[5]	오차율	10.95	10.53	9.13	8.86	7.92	7.12	5.37	4.89	4.21	3.00
		시간	1,191	1,532	1,823	2,663	3,294	3,921	4,451	5,372	5,852	6,543
D2[4]	C20	오차율	11.26	10.59	9.23	8.22	6.57	6.12	4.61	3.02	2.60	1.90
		시간	292	457	735	903	1,215	1,552	1,995	2,359	2,812	3,381
	C40	오차율	11.55	11.01	10.24	9.25	7.22	6.84	6.12	5.01	3.23	2.65
		시간	912	1,292	1,822	2,389	2,887	3,503	3,976	4,692	5,027	5,411
	C80	오차율	11.64	11.23	10.56	9.27	8.89	8.21	7.12	6.26	5.21	3.26
		시간	1,422	1,725	2,016	2,886	3,494	4,174	4,817	5,715	6,081	6,781
D3[4]	C20	오차율	11.34	11.01	10.27	9.26	8.56	7.12	7.02	5.22	5.24	3.24
		시간	535	664	935	1182	1,463	1,856	2,170	2,841	3,233	3,912
	C40	오차율	11.46	11.13	10.56	9.47	9.02	7.52	7.21	6.26	5.89	4.23
		시간	1,142	1,519	2,221	2,811	3,535	4,116	4,614	5,132	5,413	5,852
	C80	오차율	11.54	11.31	10.66	9.56	9.02	8.55	7.24	6.46	6.01	4.33
		시간	1,880	2,487	3,061	3,753	4,543	5,353	5,976	6,946	7,761	8,496

표 6. 입자수 1000과 10,000의 오차율 비와 처리시간 비(코사인)
Table 6. 1000 and 10,000 error rate of the particles and the processing time ratio (cos).

D1						D2						D3					
C20		C40		C80		C20		C40		C80		C20		C40		C80	
E***	T[6]	E	T	E	T	E	T	E	T	E	T	E	T	E	T	E	T
5.9	15.2	5.2	8.9	3.7	5.5	5.9	11.5	4.4	5.9	3.6	4.8	3.5	7.3	4.4	5.9	3.6	4.8

표 7. 입자수 1000과 10,000의 거리에 따른 오차율 비와 처리시간 비(코사인)
Table 7. Error rates according to the distance of the particle number 1000 and 10,000 processing time ratio (cos).

입자수 1000						입자수 10,000					
c20(D1:D2:D3)		c40(D1:D2:D3)		c80(D1:D2:D3)		c20(D1:D2:D3)		c40(D1:D2:D3)		c80(D1:D2:D3)	
오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비	오차율 비	시간비
1:1.1:1.1	1:1.3:2.4	1:1.2:1.1	1:1.7:2.1	1:1.1:1.1	1:1.2:1.6	1:1.1:1.9	1:1:1.2	1:1.3:2.1	1:1.1:1.2	1:1.1:1.4	1:1:1.3

나. 거리에 따른 오차율

거리의 증가에 따른 오차율의 증가폭을 알아보기 위하여 입자수 1,000과 10,000에 대하여 거리 1, 2, 3 의 에러율과 처리 시간비를 측정하였다. [표 7]은 이를 보인다. 거리 1, 2, 3에 대한 오차율비는 1.0: 1.0: 1.1~1.0: 1.3: 2.1 범위에, 처리 시간비는 1: 1.1: 1.2~1.0: 1.3: 2.4 범위에 위치하였다. 거리에 따른 오차율 비는 입자수가 많을 때 약간 커지고 처리 시간비는 입자수가 작은 때에 크게 발생하였다.

*D1: 거리 1, D2: 거리 2, D3: 거리 3. D: 프로파일의 셀과 셀이 바라보는 소스와의 실제 거리
**C20: 셀수 20, C40: 셀수 40, C80: 셀수 80. C : 프로파일의 한 면에서 나누어지는 셀의 수
***E: 에러율, T: 처리시간

표 8. 입자수 1000과 10,000의 셀수에 따른 오차율비와 처리시간비(코사인)
Table 8. Error rate according to the number of cells in a particle number 1000 and 10,000 processing time ratio (cos).

입자수 1000						입자수 10,000					
D1(c20:c40:c80)		D2(c20:c40:c80)		D3(c20:c40:c80)		D1(c20:c40:c80)		D2(c20:c40:c80)		D3(c20:c40:c80)	
오차율비	시간비	오차율비	시간비	오차율비	시간비	오차율비	시간비	오차율비	시간비	오차율비	시간비
1:1.1:1.1	1:2.4:5.4	1:1:1	1:3.1:4.9	1:1:1	1:2.1:3.5	1:1.2:1.8	1:1.4:1.9	1:1.4:1.7	1:1.6:2.0	1:1.3:1.3	1:1.5:2.2

다. 셀수에 따른 오차율

셀수의 증가에 따른 오차율의 증가폭을 알아보기 위하여 입자수 1,000과 10,000의 거리 1, 2, 3에 대하여 면당 셀수 20, 40, 80의 오차율 비와 처리 시간비를 측정하여 [표 8]을 작성하였다. 오차율비는 1.0: 1.0: 1.0~1.0: 1.2: 1.8 이고 시간비는 1.0: 1.4: 1.9~1.0: 2.4: 5.4의 범위에 속하였다. 입자수가 증가하면 셀수에 대한 오차율은 증가하였다. 가우지안 분포에서와 같이 셀 수가 증가하면 오차율도 약간 증가하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 반도체 몬테카를로 식각전산모사의 플라즈마 소스로서 사용하기 위하여 가우시안 분포와 코사인 분포의 소스모델에서 나오는 입자에 대하여 프로파일에 축적되는 플럭스를 계산하는 실험을 하였다. 입자수, 거리, 셀 사이즈의 변화에 대하여 다음 결과를 얻었다.

입자수의 증가는 1,000~10,000 구간에서 오차율을 각각 최대 4.1배(가우지안 분포), 5.9 배(코사인 분포) 감소시키고 처리시간을 각각 최대 16.7배(가우지안 분포), 15.2배(코사인 분포)증가시켰다. 그러나 입자 수 10,000개 이상에서 오차율의 감소는 미미하였다. 거리를 3 배로 하면 오차율은 각각 최대 1.2 배(가우지안), 2.1 배(코사인) 증가하고 처리시간도 각각 최대 2.5 배(가우지안), 2.4배(코사인) 증가하였다. 셀수를 20에서 80으로 증가시키면 각각 최대 1.2 배(가우지안), 1.8배(코사인) 증가시키고 처리시간도 각각 최대 5.2배(가우지안), 5.4 배(코사인) 증가하였다.

결론적으로 입자수의 증가는 오차율을 감소시키나 거리와 셀수의 증가는 오차율을 약간 증가시킨다.

본 논문에서는 몬테카를로 식각전산모사에서 소스의 에너지가 프로파일 면에 쌓이는 플럭스에 대해서 고찰했다. 향후 연구로는 플럭스에 의해서 프로파일의 면이 이동하는 현상에 대하여 전산모사를 할 계획이다.

REFERENCES

[1] ESI, “Webinar: Plasma Simulations for Semiconductor industry,” https://www.esi-group.com/company/events/2014/webinar-plasma-simulations-semiconductor-industry.
[2] J. W. Jeong, “Plasma Electronic,” Cheongmungak, 2014.
[3] D. J. Economou, “Modeling and simulation of plasma etching reactors for microelectronics,” Thin Solid Films Vol. 365, No. 2, pp. 348-367, 2000.
[4] J. A. Sethian, “Etching and Deposition in Microchip Fabrication,” Level Set Methods and Fast Marching Methods, Cambridge University Press, pp. 313-356, 2006.
[5] E. W. Scheckler, “Models and Algorithms for Three-Dimensional Topology Simulation with SAMPLE-3D,”IEEE Trans. On Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 13, No. 2, pp. 219-230, Nov. 2006.
[6] Monash University, “Semiconductor Memories,” http://www.csse.monash.edu.au/courseware/cse3142/2006/Lnts/C08.pdf.
[7] K. Harafuji and A. Misaka, “Dry Etching Topology Simulator with a New Surface Reaction Model: MODERN,” IEEE Trans. On Electron Devices, Vol. 42, No. 11, pp 1903-1911, Nov. 1995.
[8] R. Y. Rubinstein and D. P. Kroese, “Simulation and the Monte Carlo Method,”Wiley Series in Probability and Statics, 2007.
[9] NIST Information Technology Laboratory, “COSPDF,”

http://www.itl.nist.gov/div898/software/dataplot/refman2/auxillar/cospdf.pdf.
[10] M. J. Hartig and M. J. Kusher, “Monte Carlo Hydrodynamic Simulation of Neutral Radical Transport in Low Pressure Remote Plasma Activated Chemical Vapor Deposition,” Applied Physics. Letters, Vol. 62, No. 14, pp. 1594-1596, Apr. 1993.

저 자 소 개

정 승 한(학생회원)
2012년 전주대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업.
2014년 전북대학교 컴퓨터공학과 석사 졸업.
2014년～현재 전북대학교 전자정보공학과 박사과정
<주관심분야 : 컴퓨터 그래픽스, 영상처리, 컴퓨터 시뮬레이션>

신 성 식(학생회원)
2006년 전주대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업
2008년 전북대학교 컴퓨터공학과 석사 졸업
2008년 전북대학교 컴퓨터공학과 박사 졸업
2014년～현재 (주)경원테크 선임 연구원
<주관심분야 : 3D 컴퓨터 그래픽스, 패턴인식, 소프트웨어 공학>

권 오 봉(정회원)
1980년 고려대학교 전기공학과 학사 졸업
1983년 고려대학교 전기공학과 석사 졸업
1993년 일본구주대학교 총합이공학연구과 박사 졸업
1992년～1993년 일본구주대학교 정보공학과 조수
1994년～현재 전북대학교 컴퓨터공학부 교수
<주관심분야 : 컴퓨터그래픽스, 비주얼라이제이션>