

# 저 유전 재료의 에칭 공정을 위한 $H_2/N_2$ 가스를 이용한 Capacitively Coupled Plasma 시뮬레이션

論 文  
55C-12-11

## Capacitively Coupled Plasma Simulation for Low-k Materials Etching Process Using $H_2/N_2$ gas

孫 采 化<sup>†</sup>  
(Chae-Hwa Shon)

**Abstract** - The resistance-capacitance (RC) delay of signals through interconnection materials becomes a big hurdle for high speed operation of semiconductors which contain multi-layer interconnections in smaller scales with higher integration density. Low-k materials are applied to the inter-metal dielectric (IMD) materials in order to overcome the RC delay. Relaxation continuum (RCT) model that includes neutral-species transport model have developed to model the etching process in a capacitively coupled plasma (CCP) device. We present the parametric study of the modeling results of a two-frequency capacitively coupled plasma (2f-CCP) with  $N_2/H_2$  gas mixture that is known as promising one for organic low-k materials etching. For the etching of low-k materials by  $N_2/H_2$  plasma, N and H atoms have a big influence on the materials. Moreover the distributions of excited neutral species influence the plasma density and profile. We include the neutral transport model as well as plasma one in the calculation. The plasma and neutrals are calculated self-consistently by iterating the simulation of both species till a spatio-temporal steady state profile could be obtained.

**Key Words** : Capacitively, Plasma

### 1. 서 론

반도체 소자들의 크기가 지속적으로 줄어들고 집적도는 높아지고 다층의 층간막이 사용됨에 따라서 이 막들에서 일어나는 RC 지연, 간섭 잡음과 전력소모 등이 소자의 속도를 높이는 데 방해가 되고 있다. [1, 2]. 현재까지 가장 유망한 방법으로는 구리를 배선재로 사용하여 저항을 낮추고  $SiO_2$  대신에 low-k 재료를 사용하여 capacitance를 줄이는 것이다 [2]. 저 유전 (low-k) 금속 층간 절연막 (inter-metal dielectric, IMD) 에는 여러 가지가 있는데 나름대로의 특성을 보유하고 있다 [3]. 따라서 각 재료에 따른 에칭 조건과 공정이 물질에 최적화되어야 한다.

반도체 공정 장비의 플라즈마의 모델링은 장비의 디자인, 입력 전력, 가스 종류 등의 공정 조건에 따른 플라즈마의 특성을 파악하는 데 유용하게 사용될 수 있다. 예를 들어 RIE-Lag 효과나 오버/언더 에칭, 전하 축적에 의한 손상 등 공정상에서 나타나는 문제점들을 물리적으로 해석할 수 있도록 도움을 준다 [4]. 이를 이용하여 새로운 재료의 공정을 위한 새로운 장비를 설계하는데 통찰력을 제공할 수 있다.

여러 가지 저 유전 (low-k) 재료를 서로 다른 가스의 플라즈마를 발생시켜서 에칭하기 위한 기술은 많은 그룹에서 연구되어져 왔다 [2, 5-9]. 최근에는  $N_2/H_2$  조합이나  $NH_3$  플라즈마가 유기 저 유전 물질의 에칭에 적합한 것 중의 하나로 여겨지고 있다 [7-10]. 이 가스들의 조합은  $O_2$  를 기본으로 한 가스 조합에 비해 우수하다고 여겨지고 있는데 그 이유

로는 에칭 형태를 좀 더 다루기 쉽고 유전체 상수의 변화를 가져오는 후처리 손상이 적다는 장점 때문이다. 그중에서도  $N_2/H_2$  가스가 실제 공정에서는  $NH_3$  보다 더 적합하다고 알려져 있다. 이유는 독성이 없고, 공정이 쉬우며 각 가스의 분압을 독립적으로 제어하는 것이 가능하기 때문이다 [9].  $N_2$ ,  $H_2$ , 혹은  $N_2/H_2$  플라즈마에 대한 연구는 많이 되어 있지만 저기압 CCP 장비에 대한 수치적인 모델링은 거의 없었다. 최근 제시된 저 유전 재료에 대한  $N_2/H_2$  플라즈마의 에칭 원리는 다음과 같다 [10, 11]. H 래디컬에 의해서는 주로 아래쪽 바닥 물질과 수소가 결합하여 에칭이 진행되고 N 래디컬에 의해서는 벽면 물질과 질화를 거쳐서 패시베이션 막을 형성한다. 따라서 에칭 속도는 H 래디컬에 비례하고 N 래디컬에는 무관하고 N, H 래디컬들과 이온의 플럭스를 제어함으로써 저 유전 물질의 이방성 에칭이 가능하다는 것이다.

본 연구에서는 저 유전 재료의 에칭 공정을 연구하기 위하여  $N_2/H_2$  가스를 이용한 2 주파수 CCP (2f-CCP) [12] 를 플라즈마와 중성 래디컬들을 포함하여 일관성있게 모델링할 수 있는 시뮬레이션 도구를 개발하였다. 본 논문에서는 relaxation continuum (RCT) 모델 [13] 을 이용한 2f-CCP 장비를  $N_2/H_2$  가스를 이용하여 시뮬레이션 한 결과를 제시한다.  $N_2$  가스와  $H_2$  가스 각각의 플라즈마와 래디컬들의 화학적인 상호작용과 운동을 일관성 있게 고려하였고  $NH_x$  래디컬에 대한 간단한 표면 상호작용 모델을 적용하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 시스템 구성 및 모델링

RCT 모델은 플라즈마를 시뮬레이션하기 위한 유체방정식으로 개발되어 에칭 공정의 모델링에 사용되어 왔다 [13]. 본 연구에서는 이러한 RCT 모델을 확대하여 2f-CCP 내의

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 한국전기연구원 전기물리연구그룹  
선임연구원

E-mail : chshon@keri.re.kr

接受日字 : 2006年 10月 2日

最終完了 : 2006年 10月 23日

$N_2/H_2$  플라즈마를 시뮬레이션하기 위하여 개발하였다. RCT 모델에 기초하여 시스템 내에서 플라즈마와 중성 입자들의 거동을 일관성 있게 계산하기 위하여 중성 입자들의 거동을 포함하였다. 모델링에 사용된 하전입자들은 전자,  $N_2^+$ ,  $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ ,  $H^-$  등이 있고 중성입자는 H, N,  $N(^2D)$ ,  $N(^2P)$  원자와,  $N_2(A)$ ,  $N_2(B)$ ,  $N_2(C)$ ,  $N_2(a)$ ,  $N_2(a')$ , NH,  $NH_2$ ,  $NH_3$  분자 등이다.  $N_2$ 와  $H_2$  분자의 진동 여기 상태,  $N_2(1 \leq v \leq 8)$  와  $H_2(1 \leq v \leq 14)$  그리고 기저상태도 모델링에 포함되었는데 이를 통하여 이들 입자들의 상호작용을 살펴보는 것이 가능하다. 이들 중성 입자들은 전기를 띄지 않으므로 화학적인 반응과 확산이 주요한 상호작용이다. 경계조건으로는 하전입자에 대해서는 노이만 (Neumann) 경계조건이 중성 입자들에 대해서는 경계 표면으로의 열확산을 사용하였는데 이 때 반사 계수, R [14],  $R = 1-p$ , p 는 끈적 계수 (sticking coefficient) 이다.  $N_2/H_2$  가스 조합의 표면 반응 데이터를 얻기가 어려우므로 N, H, and  $NH_x$  입자들에 대한 표면 반응 계수는 같은 값으로 가정하였다.

시뮬레이션이 이루어지는 시스템의 개략도를 그림 1에 외부 조건들은 표 1에 나타내었다. 본 모델링에서는 독립된 주파수로 전압이 인가되는 두개의 전극과 원통 좌표계를 사용하였다. 위쪽 전극은 주로 높은 밀도의 플라즈마를 발생시키는 데 사용되고 아래쪽 전극은 이렇게 발생된 플라즈마를 아래쪽 기판위로 높은 에너지로 입사하도록 유도하는데 사용된다. 2f-CCP 의 이러한 기능적인 독립은 실험과 시뮬레이션을 통하여 확인된 바 있다 [12]. 본 연구에서 사용된 고주파 전극은 100 MHz 주파수에 300 V 의 전압이 인가되고 저주파 쪽은 1 MHz 주파수에 700 V 로 인가된다. 가스 압력은  $N_2(50\%)/H_2(50\%)$  혼합가스로 50 mTorr 이다. 가스의 흐름은 이번 시뮬레이션에서는 고려되지 않았다.

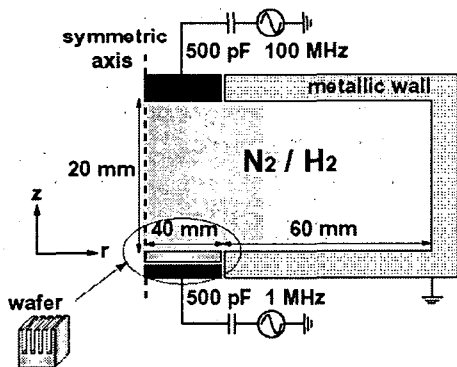


그림 1 시스템의 개략도

Fig. 1 Schematic of a simulation system

표 1 시스템의 모델링에서 사용된 조건

Table 1 Conditions of system modeling

Gas Pressure	50mTorr
Gas Composition	$N_2(50\%)/H_2(50\%)$
Drive Frequency	100MHz
Drive Voltage	300V ~ 500V
Bias Frequency	13.56MHz
Bias Voltage	400V ~ 1000V

유체방정식을 이용한 모델링에서 의미 있는 결과를 얻기 위해서는 정확한 swarm 데이터가 꼭 필요하다. 몇몇 데이터는 자체적으로 계산되었고 나머지는 다른 그룹의 결과를 사용하였다. 반응속도계수는 주로 E/N (전기장/ 중성입자밀도, Td 단위,  $1Td = 10^{-17} Vcm^2$ ) 값에 의해 결정되는데 Boltzmann 방정식을 직접적으로 수치 계산하여 얻었다 [15-16]. 전자온도 ( $T_e$ )는 통상의 CCP 시스템의 체적 (bulk) 플라즈마 온도인 3 eV로 고정하였고 중성 가스 온도 (T)는 상온인 300K 로 하였다. 수소 분자의 기저상태에는 진동여기상태가 14개 질소 분자의 기저상태에는 45개의 진동여기상태가 존재한다. 수소 분자의 경우는 14개 모두 사용되었고 질소 분자의 경우는 데이터를 얻을 수 없어서 가능한 낮은 상태부터 8개의 진동여기상태의 입자들이 사용되었다. 이러한 진동여기상태의 분자들도 플라즈마와 다른 중성입자들 혹은 다른 진동여기상태의 분자들과 상호작용을 한다. 이러한 입자들의 자세한 상호작용은 참고문헌에 나와 있다 [16].

2.2 플라즈마 시뮬레이션 결과

본 연구에서 이루어진 시뮬레이션의 결과를 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 그림에 나타난 원 안의 숫자는 시뮬레이션 순서를 나타낸 것이다. 첫 번째 시뮬레이션에서는 그림 2에서 보이는 바와 같이 RCT 모델에 기초한 플라즈마의 거동을 계산하였다. 적절한 초기조건에서 초기 플라즈마 및 중성 입자들의 밀도를 가정하여 시작하고 입자들이 정상상태에 이를 때까지 계산을 수행한다. 플라즈마 밀도의 시간 분포가 시간이 흘러감에 따라서 첫 번째 시뮬레이션의 마지막

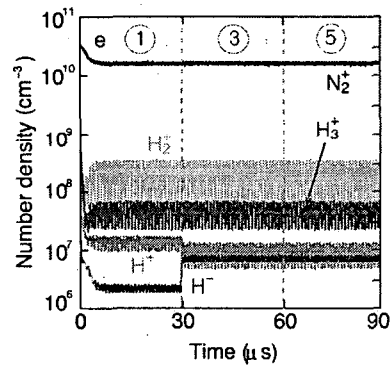


그림 2 시간에 따른 플라즈마 입자의 밀도 변화

Fig. 2 Time development of plasma density

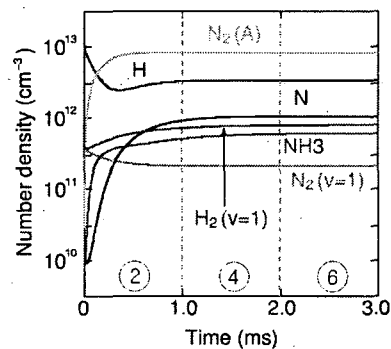


그림 3 시간에 따른 중성 입자의 밀도 변화

Fig. 3 Time development of neutrals density

즈음에 (30 ms) 거의 변하지 않고 충분히 안정되었다고 판단되었을 때 플라즈마 입자들의 계산을 멈추고 중성입자들의 거동을 계산하기 시작한다 (그림 3의 첫 번째 순서, ②번 계산). 두 번째 계산의 초기조건은 앞서 첫 번째 시뮬레이션에서 얻어진 플라즈마 밀도를 초기조건으로 하여 이루어진다. 중성입자들의 초기 밀도는 가정에 의하여 주어진다. 그림 3에서 보인 바와 같이 중성 입자들은 그림 3의 첫 번째 계산, 즉 ②번 계산에서 1 밀리 초 정도에 거의 정상상태에 이른 것을 알 수 있다. 이처럼 중성 입자들이 정상상태에 이르면 그 때의 정보를 초기조건으로 하여 세 번째 다시 플라즈마를 시뮬레이션 하게 된다 (그림 2의 두 번째 계산, ③번). ③번 계산에서는 수소 원자 두 가지만 민감하게 반응을 하고 입자들은 거의 변하지 않는다. 마찬가지로 중성 입자와 플라즈마 입자를 반복하여 ④⑤⑥번과 같이 계산을 하면 그림 2와 그림 3의 마지막 단계와 같이 플라즈마 입자와 중성 입자들 모두가 정상상태에 이른 것을 확인할 수 있다. 그림 2와 3에서 보이듯이 플라즈마와 중성 입자들이 정상상태에 이르는 시간의 척도가 다르고 또한 이를 계산할 때 이용하는 시간 계단 (time step) 의 크기가 크게 다르기 때문에 두 가지를 함께 계산하기 위해서는 많은 시간이 소요될 수밖에 없다. 이는 플라즈마 입자들이 정상 상태에 이를 동안 중성 입자들의 거동은 거의 변하지 않는다는 것을 의미하고 따라서 그 시간동안 중성 입자들의 밀도를 고정 값으로 사용하여도 큰 문제가 없다. 이후 변화된 플라즈마 밀도를 보정하기 위하여 중성 입자들을 다시 계산해야 하는데 시간 계단의 크기가 너무 다르므로 중성 입자만 큰 시간 계단으로 계산한다. 이때는 중성 입자들의 거동에 따른 플라즈마 입자들의 보정이 이루어지지 않고 고정되기는 하지만 결국 이러한 과정을 반복하면 정상상태의 결과를 얻을 수 있게 된다. 본 연구에서는 3-4번 반복하여 계산한 후에는 양쪽 모두 정상상태에 이르는 것을 확인하였다.

③번 계산 결과에서 플라즈마 밀도는  $H^-$  이온만 큰 변화를 보였는데 이는  $H^-$  이온의 근원 (source) 이 주로  $H_2$  분자의 기저상태의 진동여기상태들 ( $v>5$ ) 에 있는 입자들이기 때문이다. ②번 계산에서 진동여기상태들에 있는 중성 입자들이 초기 추정밀도보다 많이 증가하게 되는데 이것이 이후  $H^-$  이온의 증가를 가져오게 된다. 다른 플라즈마 입자들은 중성 입자의 변화에 따른 영향을 거의 받지 않았음을 알 수

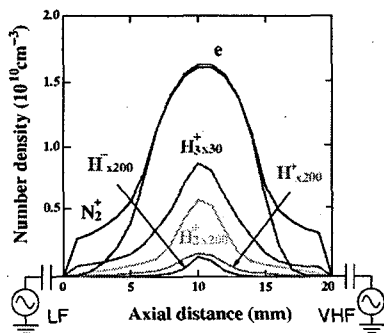


그림 4 시스템 중심축 상에서 주기 평균한 플라즈마 입자들의 밀도분포

Fig. 4 Time-averaged density distributions of the plasma on the axis

있다. 또한 ⑥번 계산에서는 중성 입자들이 그리고 ⑤번 계산의 끝에서는 플라즈마 입자들이 정상상태에 이른 것을 알 수 있다. 정상상태에서 플라즈마 입자의 중심축 상에서 주기 평균한 밀도 분포를 그림 4에 나타내었다. 주요 하전 입자들은 전자와  $N_2^+$  이온이다. 수소 플라즈마 입자들은  $N_2^+$  이온에 비해서 자리수가 한두 자리 낮은 밀도를 보였다. 수소 이온 중에서는  $H_3^+$  이온이 가장 밀도가 높은데 이는  $H_2^+$  이온의 경우는 전기장이 큰 영역에서 전자 에너지의 충돌로 생성되지만 수소 분자와 충돌하여 쉽게  $H_3^+$  이온으로 해리된다. 이는 수소 분자의 이온화 에너지보다 해리에 의해  $H_3^+$  이온으로 바뀌는 문턱 에너지가 작기 때문이다. 음이온은 주로 수소 분자의 진동여기상태와 전자 사이의 해리 흡착에 의해 이루어진다[17]. 음이온의 밀도는  $N_2^+$  이온의 밀도에 비해 두자리수 정도가 적다. 플라즈마 입자의 최대 밀도는  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  정도인데 이는 전형적인 CCP 장비의 플라즈마 밀도에 해당한다.

### 2.3 중성입자 시뮬레이션 결과

앞서 기술한 바와 같이  $N_2$  와  $H_2$  분자들의 진동여기 상태도 모델링에 포함되어 있는데 시뮬레이션에 의해서 계산된 평균 밀도의 최대값을 그림 5에 나타내었다.  $N_2$  분자는 진동여기 상태가 높아짐에 따라서 밀도는 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이것은 진동여기 상태의 에너지가 높아지면서 높은 에너지로 여기 되는 입자와 낮은 에너지로 떨어지는 입자간의 상호작용에 의한 결과로 보인다.  $H_2$  분자의 경우는  $v = 4$  에서  $v = 8$  사이의 입자들의 밀도가  $v = 3$ 의 경우보다 높게 나타나는데 이것은 특정  $H_2$  ( $B^1\Sigma_g^+$ ,  $C^1\Pi_u^+$ ) 여기 상태의 밀도가 높은 진동 여기상태에 영향을 주기 때문인 것으로 분석된다. 또한 높은 여기 상태 ( $5 \leq v \leq 9$ )의 입자들이 수소 음이온의 근원으로 작용하여 중성 입자 계산 후 증가한 진동여기 입자들의 영향으로 수소 음이온이 앞서 기술한 바와 같이 밀도가 증가하였다 (그림 3). 수소 진동여기입자들의 여기상태에 따른 밀도 분포는 다른 그룹의 결과와 일치하는 것을 알 수 있었다 [18].

수소와 질소 원자는 저 유전체 (low-k) 의 에칭에 중요한 역할을 한다. 질소 원자는 에칭 트렌치 내벽 표면에 보호막

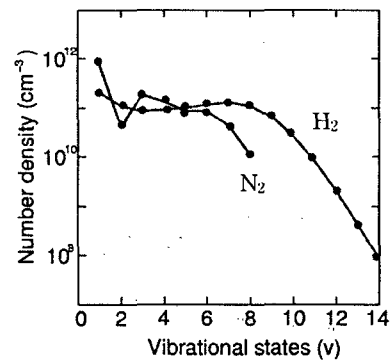


그림 5 질소와 수소 분자의 바닥상태의 진동여기상태 입자들의 밀도 분포 (주기와 공간 평균값)

Fig. 5 Space and time averaged distributions of the vibrational states of the nitrogen and hydrogen ground states

을 형성하는 역할을 담당하고 수소 원자는 트렌치 바닥의 유기물과 화학적인 결합을 하여 에칭을 하는 역할을 한다 [10]. 따라서 기판 부근의 두 입자의 밀도와 유량 (flux) 은 저 유전체 에칭공정에 중요한 인자이다. 그림 6에 시뮬레이션을 통해 계산된 질소 원자의 공간적인 분포를 나타내었다. 수소 원자의 분포도 질소 원자와 거의 흡사하고 밀도의 크기만 차이가 있다. 본 계산에서는 질소 원자의 최고 밀도는  $1.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  이고 수소 원자의 최고 밀도는  $3.3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  이다. 질소 원자와 수소 원자의 유속은 각각  $3.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $2.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  이다. 본 시뮬레이션에서는  $\text{NH}_x$  분자들 ( $\text{NH}$ ,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ) 도 포함하여 계산을 수행하였다. 하지만  $\text{NH}_x$  분자들의 경우는 공간적으로는 2차적인 반응에 의해서 생겨나기 때문에 생성 밀도가 아주 작아서 표면에서의 반응을 고려하지 않으면 시간적으로 밀도가 점차 감소되어 사라지게 된다. 따라서 밀도 분포를 계산하기 위해서는 시스템 표면에서의 해리 등의 반응을 고려해야 적절한 밀도 분포를 얻을 수 있다 [19]. 본 연구에서는 간단한 표면 반응 모델을 사용하여 고려된 모든 입자하는 중성 입자가 같은 확률로 표면에서 반응한다는 가정아래 밀도 분포를 계산하였다. 그 결과중의 한 예로 그림 7에  $\text{NH}_3$  분자의 밀도 분포를 나타내었고 최고 밀도는  $6.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  이다. 그림에서 보듯이 밀도 분포가 질소 원자나 다른 플라즈마 입자와는 다른 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다.  $\text{NH}_3$  분자의 경우는 생성 근원이 주로 기판과 챔버의 표면에 위치하고 있으므로 표면에 가까운 쪽이 밀도가 높고 자유 확산에 의해 중심부로 퍼져 나가게 되므로 중심부의 밀도가 낮으며 전체적으로 평탄한 형태를 보인다. 이는 실험 결과와도 일치하는 경향을 보였다 [10].

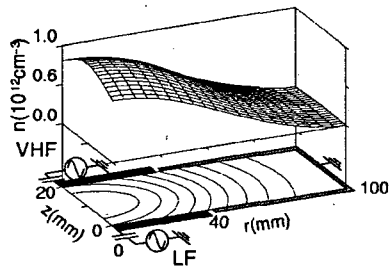


그림 6 질소 원자의 공간적인 밀도 분포  
Fig. 6 Spatial distributions of the nitrogen atoms

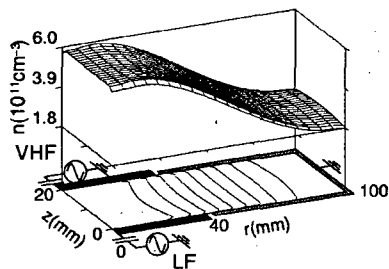


그림 7  $\text{NH}_3$  분자의 공간적인 밀도 분포  
Fig. 7 Spatial distributions of the  $\text{NH}_3$  radical

### 3. 결 론

저 유전 물질의 에칭 공정을 연구하기 위하여  $\text{H}_2/\text{N}_2$  가스를 사용한 2f-CCP 를 모델링하기 위한 도구를 RCT 모델을 이용하여 개발하고 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 본 시뮬레이션에서는 플라즈마 입자 뿐 아니라 중성 입자의 거동을 고려하여 일관성이 있는 결과를 얻도록 하였다. 중성 입자의 거동을 정확하게 모사하기 위하여 질소와 수소 바닥상태의 진동여기 상태의 입자들까지 고려하였는데 이는 진동여기상태의 입자들이 서로 뿐 아니라 다른 중성 입자들과도 상호작용을 하기 때문이다. 특히 수소 진동여기상태의 입자들은 수소 음이온의 주근원이 된다. 진동여기상태 입자들의 분포는 다른 연구결과와 일치하는 것을 확인하였다. 플라즈마 입자들 중 주 이온은  $\text{N}_2^+$  이고 수소 이온들은 그에 비해 아주 적은 밀도를 보였다. 저 유전 물질의 에칭에 중요한 입자들인 질소와 수소 입자들의 밀도와 분포도 계산하였다.  $\text{NH}_x$  분자들은 외벽으로 흡수되는 밀도가 커서 공간에서 생성되는 양만으로는 유지가 되지 않는다. 챔버 외벽에서의 반응 모델을 추가함으로써 정상 상태의 밀도 분포를 구할 수 있었다. 플라즈마와 중성입자들의 거동을 함께 모델링하여 좀 더 정확한 에칭 시뮬레이션이 가능하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] The International Technology Roadmap for Semiconductors (Semiconductor Industry Association, San Jose, Ca, 1991).
- [2] G. S. Oehrlein et al., Low Dielectric Materials for IC Applications, edited by P. S. Ho, J. Leu, and W. W. Lee, (Springer, Berlin, 2003).
- [3] G. Maier, Prog. Polym. Sci., **26**, 3 (2001).
- [4] T. Makabe and K. Maeshige, in *Advances in Low Temperature RF plasmas*, edited by T. Makabe (Elsevier, Amsterdam, 2002).
- [5] The Annual Report (Association of Super-Advanced Electronics Technologies (ASET), Tokyo, 2002).
- [6] T. E. F. M. Standaert, P. J. Matsuo, S. D. Allen, G. S. Oehrlein, T. J. Dalton, T. M. Lu, and R. Gutmann, J. Vac. Sci. Technol. **A17**, 741 (1999); T. E. F. M. Standaert, P. J. Matsuo, X. Li, G. S. Oehrlein, T. M. Lu, R. Gutmann, C.T. Rosenmayer, J. W. Bartz, J. G. Langan, and W. R. Entley, J. Vac. Sci. Technol. **A19**, 435 (2001).
- [7] M. Fukasawa, T. Tatsumi, T. Hasegawa, S. Hirano, K. Miyata, and S. Kadomura, Proc. 21st Symp. Dry Process (Tokyo 1999) p.221.
- [8] T. C. Chang, Y. S. Mor, P. T. Liu, T. M. Tsai, C. W. Chen, Y. J. Mei, and S. M. Sze, Thin Solid Films **398**, 632 (2001).
- [9] S. T. Chen, G. S. Chen, T. J. Yang, T. C. Chang, and W. H. Yang, Electrochem. Solid-State Lett., **6**, F4 (2003).

- [10] H. Nagai, M. Hiramatsu, M. Hori, and T. Goto, Jpn. J. Appl. phys., **42**, L212 (2003); H. Nagai, S. Takashima, M. Hiramatsu, M. Hori, and T. Goto, J. Appl. phys., **91**, 2615 (2002).
- [11] D. Fuard, O. Joubert, L. Vallier, and M. Bonvalot, J. Vac. Sci. Technol. **B19**, 447 (2001).
- [12] K. Maeshige, G. Washio, T. Yagisawa, and T. Makabe, J. Appl. Phys., **91**, 9494 (2002); T. Ohmori, T. K. Goto, T. Kitajima, and T. Makabe, Appl. Phys. Lett., **83**, 4637(2003).
- [13] K. Okazaki, T. Makabe, and Y. Yamaguchi, Appl. Phys. Lett., **54**, 1742 (1989); T. Makabe, N. Nakano, and Y. Yamaguchi, Phys. Rev. A **45**, 2520(1992); T. Makabe, *Advances in Low Temperature RF plasmas* (Elsevier, 2002).
- [14] P. J. Chantry, J. Appl. Phys., **62**, 1141 (1987).
- [15] K. Maeda, T. Makabe, N. Nakano, S. Bzenic, and Z. Lj. Petrovic, Phys. Rev. E, **55**, 5901 (1997).
- [16] C. H. Shon and T. Makabe, IEEE Trans. Plasma Sci., **32**, 390 (2004)
- [17] J. R. Hiskes, J. Appl. Phys., **51**, 4592 (1980); J. R. Hiskes, J. Appl. Phys., **70**, 3409 (1991).
- [18] C. Gorse, M. Capitelli, J. Bretagne, and M. Bacal, Chem. Phys., **93**, 1 (1985).
- [19] B. Gordiets, C. M. Ferreira, M. J. Pinheiro, and A. Ricard, Plasma Sources Sci. Technol., **7**, 363 (1998).

저 자 소 개



**손 채 화 (孫 采 化)**

1967년 12월 15일생. 1991년 서울대 공대 원자핵공학과 졸업(학사). 1996년 포항공대 물리학과 대학원 졸업(석사). 2001년 동대학원 졸업(이박). 2001년 3월~11월 포항공대 박사후 연구원. 2001년 11월~2003년 11월 게이오대학 연구원. 2003년 11월~현재 한국전기연구원 전기물리연구그룹 선임연구원.

Tel : (055) 280-1490

Fax : (055) 280-1419

E-mail : chshon@keri.re.kr