

## 쌍극성표동 효과와 이체충돌효과를 고려한 ICP(Inductive Coupled Plasma) 3차원 식각

이 영직\*, 이 강환\*, 이 주율\*, 강 정원\*, 문 원하\*, 손 명식\*\*, 황 호정\*

\*중앙대학교 전자공학과 반도체 공정 소자 연구실

\*\*세명대학교 전자공학과 반도체 연구실

E-mail 주소 : leeyc@semilab3.ee.cau.ac.kr

### 3D Etching Profile used Inductive Coupled Plasma (ICP) Source with Ambipolar Drift and Binary-Collision Effect.

Young-Chig Lee\*, Kang-Whan Lee\*, Ju-yul Lee\*, Jung-Won Kang\*, Won-Ha Mun\*, Myung-Sik Son\*\*, and Ho-Jung Hwang\*

\*Department of Electronic Engineering, Chung-Ang University.

\*\*Department of Electronic Engineering, Se-Myung University.

E-mail: leeyc@semilab3.ee.cau.ac.kr

#### Abstract.

ICP reactor produces high-density and high-uniformity plasma in large area, are has excellent characteristic of direction in the case of etching. Until now, many algorithms used one mesh method. These algorithms are not appropriate for sub 0.1  $\mu\text{m}$  device technologies which should deal with each ion. These algorithms could not present exactly straggle and interaction between projectile ions and could not consider reflection effects due to interactions among next projectile ions, reflected ions and sputtering ions, simultaneously. And difficult consider am-bipolar drift effect.

#### I 서론.

ICP[1] 식각에서 주요한 식각메카니즘은 스퍼터링[5]에 의한 식각이다. 스퍼터링은  $\text{SiO}_2$ 와 Si를 모두 식각 시킨다. 따라서 마스크의 두께와 마스크 폭을 고려해야만 한다. 이 논문에서는  $\text{SiO}_2$ 와 Si의 식각비율을 1:50이상으로 계산하였다. 식각률은 ICP Power와

RF bias Power에 가장 많은 의존성을 가진다. 일반적인 논문에서의[2] 식각률은 3800  $\text{\AA}/\text{min}$  이상이다. 그리고 이온의 분포는 맥스웰속도분포함수에 따라서 몬테카르노 방법을 적용하여 발생시켰다. 여기에서 플라즈마의 밀도는 압력이 10mTorr에서  $10^{12}/\text{cm}^3$ 이다. 작은 크기의 3차원 식각에서는 측면식각[3]과 구석식각이 중요한 요소로 작용하고 있다. 측면 식각과 구석식각은 이온의 진행방향에 따라 크게 좌우된다. 주입된 이온의 방향에 영향을 미치는 요소들은 가해진 전압과 쌍극성표동효과 그리고 이체충돌(Binary collision)에 의한 효과들에 의하여 방향이 변환된다.

#### II. 알고리즘

3차원적인 많은 효과들을 표현하기 위해서는 기존의 알고리즘으로 구현하기 힘들다. 주입 이온들 상호간의 작용과 타겟물질과의 작용을 표현하기 위하여 두 개의 메쉬를 별개로 계산한다.

충돌이 일어났을 때에만 두 개의 메쉬(소스

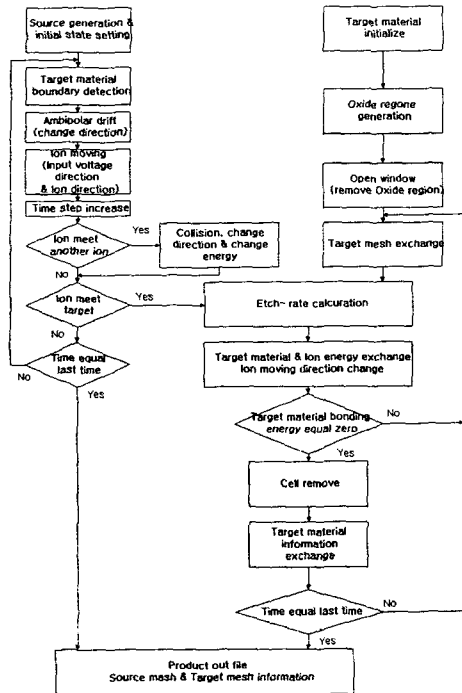


그림 1. 식각 알고리즘

메쉬, 타겟메쉬)를 결합하여 계산한다.

### III. 식각모델

식각모델은 아래의 그림처럼 모데카르로방법에 따라 이온을 발생시키고, 발생된 이온은 가해진 전압과 쌍극성표동에 따라 이동한다. 이동중 다른 이온이 존재할 경우 이체충돌에 따르며 방향과 에너지를 전달한 후에 바뀌어진 방향과 에너지로 정지력(Stopping power)에 이를 때까지 이동한다. 이동중 타겟물질이 존재할 경우 주어진 식각함수에 따

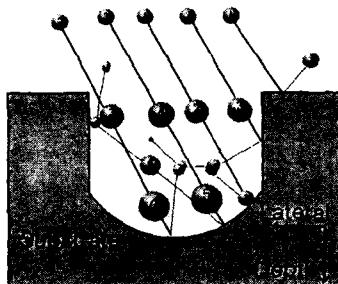


그림 2. 식각에 사용된 모델

라 타겟물질을 제거한다. 타겟물질에서 떨어져 나온 타겟이온들은 소스메쉬에 포함되어

계산된다.

### IV. 이체충돌(Binary Collision)

두 개의 이온이 충돌을 할 경우에는 탄성충돌을 한다. 이때 충돌과정과 충돌후의 방향 및 에너지는 에너지 보존법칙에 따라 결정된다. 일반적으로 이체충돌[4]을 해석하는 방법은 실험실 좌표계에서 해석하는 방법과 질량 중심 좌표계에서 해석하는 두 가지 방법을 주로 쓰고 있다. 우선 실험실 좌표계를 사용할 경우 에너지 보존법칙[6]에 따라 식 1과 같이 돈다.

$$E_0 = \frac{1}{2} m_1 v_0^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad \text{식.1}$$

여기에서  $E_0$ ,  $v_0$ 는 이온의 충돌전 운동에너지와 주입되는 이온의 속도이다. 그리고  $m_1$ ,  $v_1$ ,  $m_2$ ,  $v_2$ 는 각각 질량 및 충돌후의 속도를 나타낸다. 이것을 수직성분과 수평성분으로 각각 분리하여 표현하면 식 2와 같다.

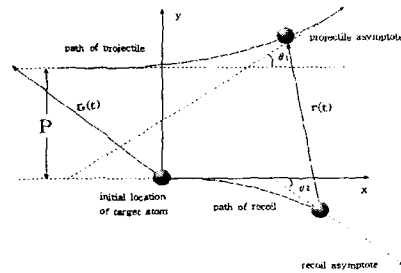


그림 3. 이체충돌의 실험실좌표계에서의 표현

$$\begin{aligned} \text{수평: } m_1 v_0 &= m_1 v_1 \cos \theta + m_2 v_2 \cos \phi \\ \text{수직: } 0 &= m_1 v_1 \sin \theta + m_2 v_2 \sin \phi \end{aligned} \quad \text{식. 2}$$

여기에서  $\theta$ 는 반사되는 이온의 각도를 표시하고  $\phi$ 는 반동되는 이온의 각도를 표시한다.

그림 3에서 최대의 충격계수는 식 3으로 나타낼 수 있다.

$$P_{\max} = \frac{\alpha}{(\epsilon t_{\min}/\gamma)^{1/2} + (\epsilon t_{\min}/\gamma)^{1/4} + 1/8(\epsilon t_{\min}/\gamma)^{1/20}} \quad \text{식.3}$$

### V. 쌍극성표동

3차원의 기하학적인 구조에서는 구조에 따른 필드의 변화로 인하여 이온의 진행방향이 바뀌어지게 된다. 이런 충돌에 의한 방향 변환과 더불어서 측면식각의 주요원인으로 작용하고 있다.

이온이 받는 힘은 표면의 이온들의 상호작용에 의한 힘의 합과 같다.

$$\vec{F}_i = \vec{E}_i, q = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots)q \quad \text{식.4}$$

그림5는 평행판에서는 쌍극성표동 효과를 고려한 결과이다. 깊이에 따른 측면 식각을 보

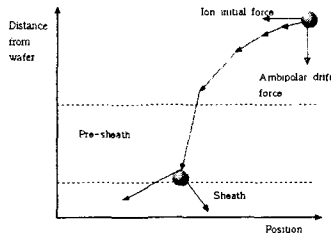


그림 4. 쌍극자표동으로 방향이 전환

여주고 있다. 깊이가 작은 영역은 이온의 휨 정도가 작아 식각률이 작고 깊이 들어갈수록 이온이 휨각도가 커져서 식각이 많이 일어남

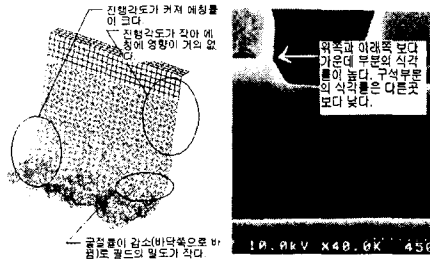


그림 5. 2차원 쌍극자표동을 볼 수 있다.

### V. 식각률

식각률함수는 간단히 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \Gamma \cdot S \cdot \frac{w}{\rho} \quad \text{식.5}$$

여기에서 R은 식각률함수, S는 스퍼터링함수 [5],  $\Gamma$ 는 이온플럭스함수, w는 이온무게, 그리고  $\rho$ 는 타겟물질의 밀도를 나타낸다. 먼저  $\Gamma$ 는 Maxwell velocity distribution을 이용하여 속도분포함수를 구할 수 있다. 이 속도 분포함수는 아래 식으로 표현할 수 있다.

$$f_n(v) = n_{n0} \left( \frac{m_n}{2\pi k T_n} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{M_n}{2kT_n} [v_x^2 + (v_y + v_0)^2 + v_z^2] \right\} \quad \text{식. 6}$$

$-\infty < v_x, v_y < \infty$  그리고  $0 < v_z < \infty$

식6에서  $n_{n0}$ 는 물질의 질량, k는 Boltzman 상수[3],  $T_n$  플라즈마의 온도, 그리고  $v_0$ 는 방향속도를 나타낸다. Energy 보존법칙에 의해서  $v_y$ 는 식7과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{2} M_i v_{y0}^2 = \left( \frac{1}{2} \right) M_i v_y^2 - \epsilon V_s$$

$$v_y^2 = \sqrt{\frac{2\epsilon}{M_i} V_s + v_y^2} \quad \text{식. 7}$$

분포함수를 다시 표현하면 식 8과 같다.

$$f_n(v) = n_{n0} \left( \frac{m_n}{2\pi k T_n} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{M_n}{2kT_n} [v_x^2 + \left( \sqrt{v_{y0}^2 + \frac{2\epsilon V_s}{M_i}} + v_0 \right)^2 + v_z^2] \right\} \quad \text{식.8}$$

$-\infty < v_x, v_y < \infty$  그리고  $\sqrt{(2\epsilon V_s/M_i)} < v_y < \infty$

식8을 이용하여 밀도함수  $\Gamma$ 를 구하면 식9와 같다.

$$\Gamma = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\sqrt{2\epsilon V_s/M_i}}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_y f_n(v) dv_x dv_y dv_z = \frac{n_n}{\pi} \left( \frac{2kT_i}{m_i} \right) \exp \left\{ \frac{\epsilon V_s}{kT} - \left( \frac{v_0}{v_{th}} \right)^2 \right\} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} G_i(\theta) \cos \theta d\theta \quad \text{식.9}$$

$$\left[ \begin{aligned} &\text{여기에서 } v_{th} = \left( \frac{2kT}{M_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \\ &G_i(\theta) = \int_{\sqrt{R \sec \theta}}^{\infty} \xi^2 \exp(-\xi^2) \exp(2S_i \cos \theta \sqrt{\xi^2 - R \sec^2 \theta}) d\xi \end{aligned} \right]$$

그리고 Sputterig 함수는 식10으로 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{3\alpha}{4\pi^2} \cdot \frac{S_n(E)}{U_0} \quad \left( \alpha = \frac{m_i}{m_e} \right) \quad \text{식.10}$$

여기에서  $S_n(E)$ 는 정지력[4] 이고  $U_0$ 는 결합

$$T = \frac{1}{2} m_i v_i^2$$

$$T = \frac{M_i}{2} \left( \frac{2v_0 M_i \cos \phi}{M_i} \right)^2$$

$$= \frac{2}{M_i} (v_0 M_i \cos \phi)^2$$

여기에서  $2\phi = (\pi - \theta)$

$$\therefore T = \frac{2}{M_i} (v_i M_i \sin \frac{\theta}{2})^2$$

$$= \frac{4EM_i^2}{M_i} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

$$= \frac{4EM_i M_i}{(M_i + M_i)^2} \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad \text{식.11}$$

에너지이다. 그리고 정지력은 식11과 같다.

### VI. 결과 및 고찰

이온의 에너지는 rf bias(13.56MHz)로서 공급된다. 그림6은 타겟물질이 평형판[6]일때 Ar 이온빔전류에 대한 식각률[8]을 나타낸 것이다. 여기에서 플라즈마 밀도는  $10^{12}/\text{cm}^2$ 이다. 여기에서 rf power는 150W이다. 평형판에서는 식각률이 이온빔전류의 변화에 대하여 거의 선형적으로 비례한다.

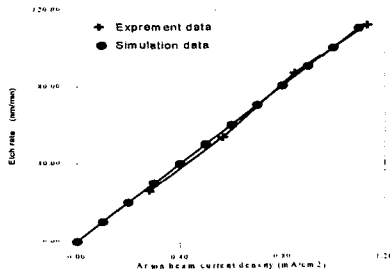


그림 6. 이온빔 전류에 따른 식각률

그림7은 타겟물질이 평형판일 때 rf power에 따르는 식각률을 나타낸 것이다. 여기에서 이온빔전류는  $1\text{mA}/\text{cm}^2$ 이다.

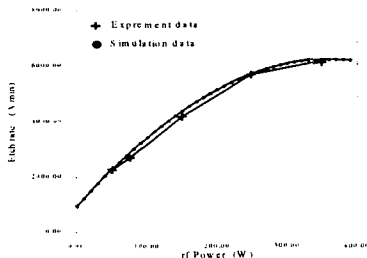


그림 7. rf power에 따르는 식각률

그림8은 스텐포드대학에서 개발된 SPEEDIE 3.0 ETCHDEPO 툴을 사용한 식각형상이며, 그림9는 본 연구를 통하여 제안된 쌍극성표동과 이체충돌을 고려한 2차원 식각형상을 보여준다.

그림9는 rf power가 150W, 이온빔전류가  $1\text{mA}/\text{cm}^2$ , 압력이 10mTorr 일 때 각각 시간이 0, 60, 120, 150 경과된 이후의 3차원 형상이다.

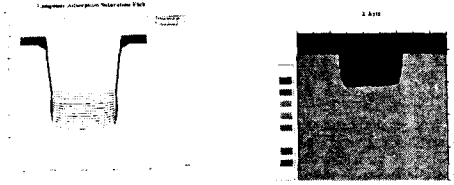


그림 8. 2차원 형상. 스텐포드대학의 SPEEDIE 3.0ETCHDEPO. 본논문에서사용된 형상

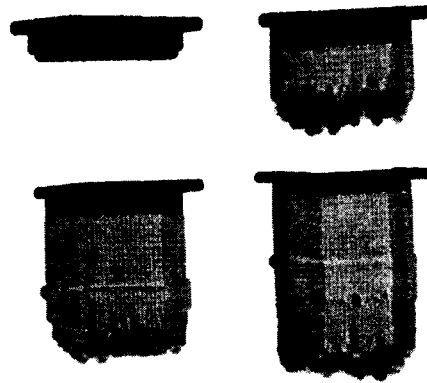


그림9. 그림9는 rf power가 150W, 이온빔전류가  $1\text{mA}/\text{cm}^2$ , 압력이 10mTorr 일 때 각각 시간이 0, 60, 120, 150 경과된 이후의 3차원 형상

#### Reference

- [1] David J. Johnson, Michael W. DeVre, "Recent advances in the use of plasma etching for micro-machining", EEP-Vol.19-1, advances in electronic packaging-1997. Volume 1. ASME 1997.
- [2] Kenny K. H. Toh, Andrew R. Edward W. Scheckler, "Algorithms for Simulation of Three-Dimensional Etching" IEEE Transactions on computer-aided design of intergrated circuits and systems, Vol. 13, No. 5 May 1994
- [3] L. H. Li "An analytic solution of the Boltzmann equation in the presence of self-generated magnetic field in astrophysical plasma"
- [4] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, U. Littmark, The stopping and range of ions in solids, Handbook of Ion implantation Technology, North Holland, 1992.
- [5] J.Y.Lee, Y.C.Lee, K.H.LEE, M.S.Son, H.J. Hwang, "A Numerical Analysis on the Development of ICP Source for Large Area LCD" Proceedings of IEEK Fall Conference 98 Vol.21 No 2, 573,
- [6] Shahid Raul, Mark J. Kushner "Model for noncollisional heating in inductively coupled plasma processing source". J. Appl Phys. 81 (9), 1 May. 1997.
- [7] I. Adesida, C. Uoutsey, S. T. Ping, F. Khan, L. T. Romano, "Dry and wet etching for group III-Nitride", MRS internet J. Nitride Semiconductor Res. 4S1.G1.4(1999).
- [8] R. J. Shul, G. B. McClellan, S. A. Casalnuovo, and D. J. Rieger "Inductively coupled plasma etching of Gan". Appl. Phys. Lett. 69(8).19 August