

초미세 공정에 적합한 ICP(Inductive Coupled Plasma) 식각 알고리즘 개발 및 3차원 식각 모의실험기 개발

이 영직, 박 수현, 손 명식, 강 정원, 권 오근, 황 호정
중앙대학교 전자공학과 반도체 공정 소자 연구실
156-756 서울시 동작구 흑석동 221
E-mail 주소 : leeyc@semilab3.ee.cau.ac.kr

Development of New Etching Algorithm for Ultra Large Scale Integrated Circuit and Application of ICP(Inductive Coupled Plasma) Etcher

Young-Chig Lee, Su-Hyun Park, Myung-Sik Son, Jyung-Wun. Kang, Oh-Keun. Kwon, and Ho-Jung
Hwang
Semiconductor Process and Device Lab., Dept. of Electronic Engineering,
Chung-Ang Univ., Seoul, 156-756, KOREA
E-mail: leeyc@semilab3.ee.cau.ac.kr

Abstract - In this work, we proposed proper etching algorithm for ultra-large scale integrated circuit device and simulated etching process using the proposed algorithm in the case of ICP (inductive coupled plasma)[1] source.

Until now, many algorithms for etching process simulation have been proposed such as Cell remove algorithm, String algorithm and Ray algorithm. These algorithms have several drawbacks due to analytic function; these algorithms are not appropriate for sub 0.1 μm 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. In order to apply ULSI process simulation, algorithm considering above mentioned interactions at the same time is needed.

Proposed algorithm calculates interactions both in plasma source region and in target material region, and uses BCA (binary collision approximation)[4] method when ion impact on target material surface. Proposed algorithm considers

the interaction between source ions in sheath region (from Quartz region to substrate region). After the collision between target and ion, reflected ion collides next projectile ion or sputtered atoms.

In ICP etching, because the main mechanism is sputtering, both SiO_2 and Si can be etched. Therefore, to obtain etching profiles, mask thickness and mask composition must be considered. Since we consider both SiO_2 etching and Si etching, it is possible to predict the thickness of SiO_2 for etching of ULSI.

1. 서론

반도체 공정의 초미세화로 식각공정에서 지금까지의 알고리즘으로는 표현하기 힘든 효과들이 발생한다. 이전의 알고리즘은 기판에서만만의 효과를 주로 고려하여 모의 실험을 하였다.(2) 그로 인하여 시스영역에서의 이온들의 충돌효과를 바르게 표현하지 못하였다. 그리고 기판에 충돌후 이온의 비행경로를 추적하지 않음으로 기판에 충돌후 이온이 다른 입사이온에 미치는 영향을 고려할 수가 없었다.(1) 식각 모의실험기는 3차원 표현을 기본으로 하고 있어야 한다. 3차원을 표현할 때 기존의 해석적인 방법(3)으로는 서브미크론 단위의 패턴의 구석부분을 정확하게 표시할 수 없게 된다. 이런 효과를 표현하기 위하여서는 기존의 식각 알고리즘이 아닌 새로운 알고리즘을 필요하게 되었다. 새로이 개발한 식각 알고리즘은 플라즈마 이온영역과 기판영역을 나누

어서 계산을 수행함으로써 이온들의 효과들을 보다 정확하게 표현할 수 있다. 그리고 이온 개개를 다루어 계산을 수행함으로써 서브미크론 단위의 식각결과를 얻을 수 있다.

II. 본론

초미세 공정에서의 식각 simulator 알고리즘은 이온상 호간의 영향(4)을 무시해서는 안된다. 기존의 식각 simulator에서 사용되는 알고리즘은 식각되는 물질내에서만 모든 효과들을 고려 하였다. 그러나 공정이 미세화 될수록 이런 효과들만으로는 정확한 profile을 얻을 수 없다.

새로이 제안된 알고리즘은 두 개의 mesh 알고리즘을 사용한다. 하나의 mesh 즉 Source mesh는 자유공간 상에서의 이온들의 이동과 에너지를 표시한다. 이것은 플라즈마 영역에서 출발한다. 플라즈마 generation simulator(5)에서 얻은 플라즈마 밀도를 Sheath영역에 인가한 Voltage에 의해 energy를 증가시키고 동시에 source mesh를 성장시킨다. 지금까지의 algorithm은 식각물질의 표면에서 source(이온)를 고려함으로써 구체적인 source ion의 비행경로와 상호작용에 대하여서는 구체화되지 못 했다. 그러나 새로운 알고리즘에서의 Source mesh는 target물질을 만나기 전까지 서로 영향을 미치면서 성장한다. source의 각 point는 x, y, z 속도 성분을 모두 포함하고 있어 sheath영역에서 Plasma ion들의 상호작용과 간섭에 대하여 보다 정확하게 고려 할 수 있다.

이 algorithm은 그림10에서와 같이 이전의 algorithm과 차이가 있음을 알 수 있다.

Source mesh의 성장과정은 z에서 z+1로 증가할 때, 증가된 인접 노드에도 함께 data값을 전달한다. 인접된 노드에 전달되는 data는 플라즈마 본래의 속도성분과 상호충돌이 발생할 경우 상호작용에 의해서 변화된 성분의 data값이다. data 전달후에는 z는 reset된다. 그리고 z+1로 이동한 z' 값은 z+1의 data와 더하여 진다. 이런 과정을 통해 source mesh는 계속 발생하고 성장한다.

그리고 source 이온과 target 물질이 만나면 에너지를 전달한다. target 물질은 bonding energy의 정보를 가지고 있다.

이 algorithm의 장점은 두 개의 mesh를 사용함으로써 source와 target material을 보다 자세히 표현할 수 있다.

여기에서 사용되는 Etch rate는 아래의 식으로 단순화하여 나타낼 수 있다.

$$R = \Gamma \cdot S \cdot \frac{w}{\rho}$$

여기에서 각각은 다음을 나타낸다.

R : etch rate function

S : sputtering function

Γ : ion flux function

w : atom weight

ρ : material density

식각 rate는 Ion flux와 Sputtering 함수에 비례하고 w/ ρ 에 비례한다.

먼저 Γ 는 Maxwell velocity distribution을 이용하여 속도분포함수를 구할 수 있다. 이 속도 분포함수는 아래 식으로 표현할 수 있다.

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

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

n_{n0} : 물질의 질량

k : Boltzman 상수

T_n : neutral 온도

v_0 : directional velocity

위의 속도분포함수에서 표는 sheath 영역에서 neutral 이 얻은 energy이다. energy 보존법칙에 의해서

$$\frac{1}{2} M_i v_{i0}^2 = \left(\frac{1}{2} \right) M_i v_y^2 - \epsilon V_s$$

$$v_y^2 = \sqrt{\frac{2\epsilon}{M_i} V_s + v_y^2}$$

위 식과 같이 된다. 위식을 이용하여 Maxwell velocity distribution을 다시 표현하면

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

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

Flux Γ 는 $\iiint v_y f_i(v) dv$ 로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Gamma &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{\sqrt{2\epsilon V_s/M_i}}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v_y f_i(v) dv_x dv_y dv_z \\ &= \frac{n_{n0}}{\pi} \left(\frac{2kT_i}{m_i} \right) \cdot \exp \left\{ \frac{\epsilon V_s}{kT} - \left(\frac{v_0}{v_{th}} \right)^2 \right\} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} G(\theta) \cos \theta d\theta \\ &\left[\text{여기에서 } v_{th} = \left(\frac{2kT}{M_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \right. \\ &\left. G(\theta) = \int_{\sqrt{R \sec^2 \theta}}^{\infty} \xi^2 \exp(-\xi^2) \exp(2S_i \cos \theta \sqrt{\xi^2 - R \sec^2 \theta}) d\xi \right] \end{aligned}$$

다음으로 Sputtering rate에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{3\alpha}{4\pi^2} \cdot \frac{S_n(E)}{U_0} \quad \left(\alpha = \frac{m_i}{m_t} \right)$$

여기에서 $S_n(E)$ 는 stopping power[4] 이고 U_0 는 bonding energy이다.

여기에서 stopping power는

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

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

$$= \frac{2}{M_t} (v_0 M_0 \cos \phi)^2$$

여기에서 $2\phi = (\pi - \theta)$

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

$$= \frac{4EM^2}{M_t} \sin^2 \frac{\phi}{2}$$

$$= \frac{4EM_i M_t}{(M_i + M_t)^2} \sin^2 \frac{\phi}{2}$$

로 구할 수 있었다. ICP 식각의 주된 식각메카니즘은 물리적 식각인 스퍼터링이다. 위의 식을 이용하여 모의 실험을 행함으로써 물리적 영향을 적절히 표시 할 수 있었다.

III. 식각모의실험을 위한 새로운 알고리즘

새로이 제안된 알고리즘은 반응로에서 발생된 이온 [6]을 동시에 시간간격에 따라서 이동 시킴으로써 이온의 이동을 추적한다. 그리고 이동되는 동안 다른 이온이나 기판을 만났을 때 BCA를 이용하여 계산을 수행한다.

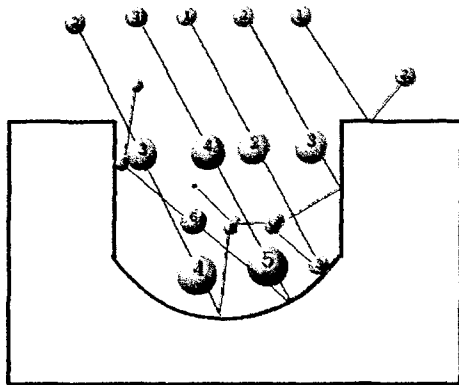


그림 1 이온의 이동경로를 표시한다. 여기에서 원의 반지름은 이온이 가지고 있는 에너지이다. 그리고 원 내부의 숫자는 위치에서의 timestep를 나타낸다.

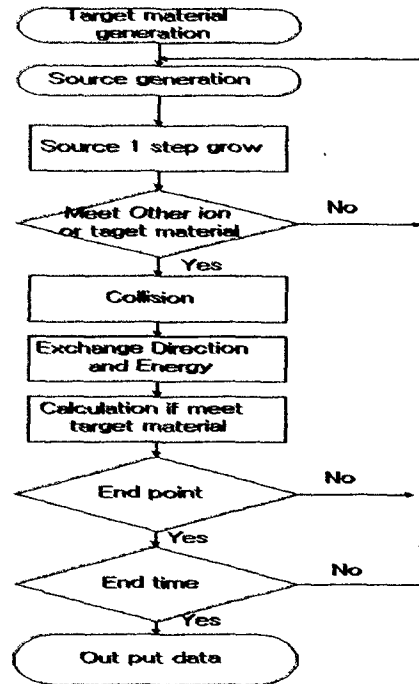


그림 2. 초미세공정을 위한 알고리즘의 개략적 표현

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

아래 그림들은 새로이 제안된 알고리즘을 통한 식각모의 실험 결과이다.

그림3는 10mTorr에서 플라즈마의 밀도가 $10^{12}/\text{cm}^2$ 일 때 60 Timestep이 경과 하였을때의 결과이다.

그림4은 그림3의 3차원 표현이다.

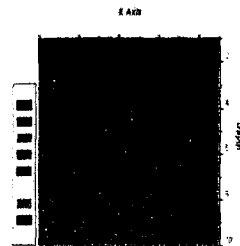


그림 3. 압력이 10mTorr, 플라즈마 밀도 $10^{12}/\text{cm}^2$ a 그리고 Si 와 SiO의 선택비가 50에서의 time step이 60일 때의 2-D식각분포

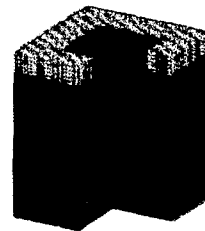


그림 4. 압력이 10mTorr, 플라즈마 밀도 $10^{12}/\text{cm}^2$ a 그리고 Si 와 SiO의 선택비가 50에서의 time step이 60일때의 3-D 식각분포fig

그림5는 그림3과 같은 동일조건에서 Timestep을 120으로 증가 시켰을때의 profile 이다.

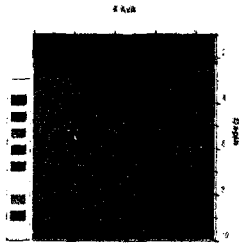


그림 5. 압력이 10mTorr, 플라즈마 밀도 $10^{12}/\text{cm}^2$ 이고 Si 와 SiO₂의 선택비가 50에서의 time step이 120일 때의 2-D식각분포

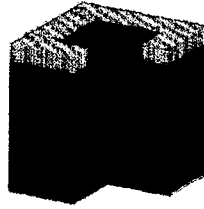


그림 6. 압력이 10mTorr, 플라즈마 밀도 $10^{12}/\text{cm}^2$ 이고 Si 와 SiO₂의 선택비가 50에서의 time step이 120일 때의 3-D식각분포

그림 7은 그림 3과 동일한 조건에서 Timestep을 250으로 증가시켰을 때의 profile 이다.

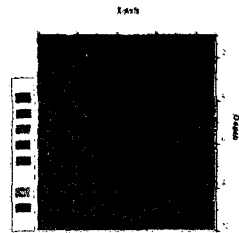


그림 7. 압력이 10mTorr, 플라즈마 밀도 $10^{12}/\text{cm}^2$ 이고 Si 와 SiO₂의 선택비가 50에서의 time step이 250일 때의 2-D식각분포

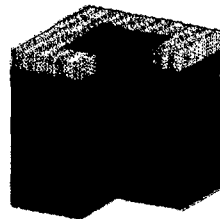


그림 8. 압력이 10mTorr, 플라즈마 밀도 $10^{12}/\text{cm}^2$ 이고 Si 와 SiO₂의 선택비가 50에서의 time step이 250일 때의 3-D식각분포

V. 결론

3차원 식각공정 시뮬레이터인 LICPES(lee inductive coupled plasma etching simulator)를 이용한 식각공정 모의실험 결과와, 다른 ICP 식각실험 결과를 비교하여 시뮬레이터의 신뢰성을 확보하였다.

참고 문헌

- [1] David J. Johnson, Dichaël 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] 이주율, 이영직, 이강환, 손명식, 황호정, "대면적 LCD용 ICP소스에 대한 수치 해석적 분석" 전자공학회 제 21회 추계학술대회 제 2권. 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