

공정변수를 사용한 플라즈마 식각단면의 전산모사

조병옥 · 김일욱 · 문상흡[†]

서울대학교 화학공학과
(1994년 2월 18일 접수, 1994년 5월 26일 채택)

Simulation of Plasma Etch Profile Based on Process Variables

Byeong Ok Cho, Yil Wook Kim and Sang Heup Moon[†]

Dept. of Chem. Eng., Seoul National University
(Received 18 February 1994; accepted 26 May 1994)

요 약

플라즈마 식각단면의 모사에서 내부변수와 공정변수 간의 관계식을 문헌의 실험자료와 물리, 화학적인 이론에 근거하여 도출하였다. 이 관계식에 의하여 통상적인 SF_6 계에서의 식각속도를 구했는데 이것은 문헌에 보고된 식각속도와 크기자리수의 범위에서 일치하였다. 또, 이 관계식에 의하여 공정변수인 압력과 전력을 변화시켜가며 계산한 식각속도의 변화는 실제의 경향과 일치하였다. $Cl_2/HBr/He$ 계의 식각실험을 압력과 전력을 바꾸어 가며 수행하였다. 위에서 도출한 관계식의 계수와 지수를 C_1, C_2, C_3 의 세 가지 매개변수로 놓고 세 개의 실험결과에 fitting하였다. 이렇게 얻은 매개변수값을 사용하여 다시 다른 실험결과에 대하여 모사했을 때 실험결과와 잘 일치하는 식각단면을 얻을 수 있었다.

Abstract—The correlations between the internal and the process variables in plasma etching were derived based on fundamental theories as well as experimental data from literatures. The rates of plasma etching in SF_6 system were calculated based on these correlations, which agreed with the reported experimental values within the same orders of magnitude. The etch rates calculated for various process conditions changed in the same trend as the experimentally measured ones. Reactive ion etching(RIE) in $Cl_2/HBr/He$ system was performed under different pressures and electrical powers. Parameters in the correlation equations derived from literatures were replaced by three adjustable parameters, C_1, C_2 , and C_3 , which were determined by fitting the simulation profiles to the three experimental results. Trench contours simulated using these parameters agreed well with those obtained from the experiments.

1. 서 론

플라즈마 식각공정의 식각속도, 비등방도, 마스크에 대한 식각선택도, 균일도 등은 반응기체의 종류와 유량, 기압, 부하전력, 전극의 간격, 마스크의 형태 등 수많은 변수에 의해 동시에 영향을 받으므로 식각공정을 정확히 제어하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러므로 플라즈마

식각현상을 더 잘 이해하고 공정을 정확히 제어하기 위해 현재까지 수많은 식각실험과 함께 식각전산모사 연구가 수행되어져 왔다[1-4].

반도체 가공공정의 조건에 따라 가공특성이 어떻게 변화하는지를 예측하기 위한 반도체공정 전산모사기로 지금까지 여러 가지가 개발되었으며, 그 중에서 대표적인 것은 SUPREM[1], SAMPLE[2], DEPICT[3], COM-

POSITE[4] 등이 있다. 그러나 이 모사기들은 식각공정에 대해서는 매우 단순한 모델만을 사용하거나 반경험적(semi-empirical)인 방법으로 처리했기 때문에 그 예측도와 신뢰도가 매우 낮은 실정이다.

한편, 물리, 화학적인 모델링을 했다고 해도 대부분의 식각모사기가 공정변수(process variable)가 아닌 내부변수(internal variable)를 입력하여 결과를 얻으므로 현장에서의 실용성이 희박하다. 여기서 공정변수란 압력, 전력, 유량, 기판온도 등으로서 원하는 특성의 식각을 위해 직접적으로 측정, 조작할 수 있는 변수이다. 한편, 내부변수란 공정변수에 의해 조건이 잡혀진 플라즈마 식각계의 성질을 나타내 주는 모델링 상의 변수로서, 플라즈마 전위, sheath의 두께, 이온의 flux 등이며 측정, 조작이 실질적으로 불가능한 변수이다. DEPICT[3]의 경우에 입력변수로서 공정변수를 사용하기는 하나, 의미있는 모델링이 없이 단순히 실험결과를 통계처리하여 식각속도를 이들 공정변수의 polynomial 형태로 표시했을 뿐이다.

우수한 식각모사기가 갖추어야 할 조건은 첫째로 물리, 화학적으로 정확한 모델에 기초를 두고, 둘째로 입력변수로서 공정변수를 사용하며, 셋째로 모사한 식각단면을 나타내는 좌표계의 종축과 횡축의 단위를 실척(real scale)으로 표시할 것 등이다. 본 연구에서 개발한 모사기는 이 3가지 조건을 모두 포함하였으나, 특히 두 번째에 중점을 두었다. 본 연구에서는 모델링에 사용된 내부변수와 공정변수 간의 관계식을 문헌의 자료와 이론에 근거하여 유도하였고, 이것을 몇 개의 실험결과에 fitting하여 관계식 중의 지수와 계수에 대한 최적값을 구하였다. 또한 개발된 모사기를 다른 공정조건에 대하여 그대로 적용하여 얻은 모사결과와 실험결과를 비교함으로써 모사기의 타당성을 입증하였다.

2. 공정변수와 내부변수 간의 관계식

2-1. 관계식의 적용범위

Sheath 내에서 가속되는 이온이 중성입자와 연속충돌한 후 기판표면에 도달하여 이를 식각하는 공정에 대한 전산모사방법은 이미 앞선 논문[5-7]에 상세히 보고되었다. 이 전산모사방법에서 사용되는 주요 내부변수는 이온의 가속도, 이온의 평균자유행로(mean free path), sheath의 두께, 중성입자에 의한 식각속도, 이온에 의한 식각속도, 이온 glancing의 기준각도 등이다. 한편, 플라즈마 식각의 공정변수는 온도, 압력, 반응물 농도, 전기장의 크기 등을 들 수 있다.

플라즈마 식각공정은 반응계에 대한 의존도가 매우 크기 때문에 어떤 계에서는 내부변수와 공정변수 간의

Table 1. Two systems for deriving correlations between process and internal variables

	SF ₅ ⁺ /SF ₆ system	CF ₃ ⁺ /CF ₄ system
Mass ratio	127.066/146.066 =0.870	69.011/88.011 =0.784
Electrode gap	5 cm	3 cm
Cathode dimension	15.6 cm ϕ	10.0 cm ϕ
RF power	0.26 W/cm ²	1.27 W/cm ²
Electric field	in typical plasma process, 100-1000 V/cm	
Pressure range	10-40 mTorr	100-600 mTorr
Reference	[6]	[6]

관계식이 비교적 잘 맞지만 다른 계에서는 맞지 않는 일이 많다. 따라서, 관계식을 도출하기 전에 이 식이 적용되는 계를 정의하고 그 계에서 식이 유용하게 쓰일 수 있는 변수의 범위를 명확히 해 두는 것이 필요하다. 이 연구에서는 Table 1과 같이 정의된 두 가지 계에 대하여 관계식을 도출하였다. Table 1에서 SF₅⁺/SF₆ 계란 반응기체가 SF₆일 때 플라즈마 내에 존재하는 이온의 종류 중 SF₅⁺의 양이 가장 많다는 것을 가리킨다 [8].

2-2. 관계식의 도출

2-2-1. 이온의 가속도(a)

질량이 m, 전하량이 q인 이온이 전기장의 크기가 E인 sheath를 통과할 때 가속도 a를 가진다면 이 때 이온이 받는 힘은 (1)식과 같다.

$$F = ma = qE \quad (1)$$

따라서 이온의 가속도 a는 qE/m이고 두 계에 대한 상수값을 대입하면 다음 (2), (3)식과 같이 표시된다.

$$a = 7.58 \times 10^9 E : \text{SF}_5^+ \text{의 경우} \quad (2)$$

$$a = 1.40 \times 10^{10} E : \text{CF}_3^+ \text{의 경우} \quad (3)$$

2-2-2. 이온의 평균자유행로(λ)

이온의 평균자유행로, λ ,는 기체분자운동론에 의해 (4)식과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{1}{N_g \sigma} \quad (4)$$

보통의 플라즈마 공정에서 압력 P는 20-200 mTorr 이고 σ 는 $1.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ 정도라고 알려져 있다[9]. 저압공정이므로 이상기체를 가정하고 공정온도를 300 K로 놓으면, λ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{20.7}{P} \quad (5)$$

(5)식은 보통의 플라즈마 식각공정에서 내부변수인 평균자유행로, λ ,와 공정변수인 압력, P ,의 관계식이다.

2-2-3. Sheath의 두께(Sh)

Sheath의 두께, Sh ,는 압력에 따라 변하게 되는데, Mutsukura 등[8]에 의하면 대략 50-500 mTorr의 압력범위에서 $P^{-0.5}$ 에 정비례하며 (6)식과 같이 표시될 수 있다.

$$Sh = K_0 P^{-0.5} \quad (6)$$

SF_5^+/SF_6 계와 CF_3^+/CF_4 계에 대하여 (6)식의 관계식이 정확히 성립하는 압력 범위는 Table 1에 표시하였다. K_0 의 값은 SF_5^+/SF_6 계의 경우 $2.973 \text{ cm mTorr}^{0.5}$, CF_3^+/CF_4 계의 경우에는 $7.368 \text{ cm mTorr}^{0.5}$ 이다[8].

2-2-4. 중성입자의 식각속도(R_{neu})

중성입자에 의한 식각속도의 관계식을 얻기 위해서는 이온의 효과를 배제해야 하므로 Si 기판 위에 sheath가 존재하지 않는 플라즈마계를 고려해야 한다. Flamm [10]은 반응성 중성입자의 수명(life time)이 이온보다 길다는 것에 착안하여 플라즈마 방전이 끝난 직후 반응기에 Si 기판을 넣고 반응하는 불소입자의 화학적 발광(chemiluminescence)을 연구하여 다음의 관계식 (7)을 얻었다.

$$R_{neu} = 2.91 \times 10^{-11} N_F T^{0.5} \exp(-0.108/kT) \quad (7)$$

또, Ninomiya 등[11]은 Si 기판을 플라즈마의 외부에 놓고 플라즈마에서 발생한 불소원자를 기판이 있는 곳으로 도입하여 식각하는 방법으로 다음 (8)식을 얻었다.

$$R_{neu} = 10^{-11.35} N_F \quad (8)$$

위의 두 식에서 기상온도를 300 K로 대입하여 비교해 보면 계수의 값이 거의 같다는 것을 알 수 있다.

또한, Ninomiya 등[11]은 실험에서 불소원자의 농도, N_F ,와 압력, P ,과의 관계를 나타낸 결과로부터 다음과 같은 식을 얻었다.

$$N_F = 10^{15.35} P^{0.775} \quad (9)$$

(8), (9)식으로부터 최종적으로 300 K에서 중성입자만의 식각속도를 압력의 함수로 나타낼 수 있는데 이것은 (10)식과 같다.

$$R_{neu} = 7.89 \times P^{0.775} \quad (10)$$

2-2-5. 이온의 식각속도(R_{ion})

2-2-5-1. 이온 Flux(j)

반응기 내의 압력이 높지 않으면 sheath를 통과하는 이온의 flux, j ,는 (11)식으로 나타낼 수 있다. 이 식은 Child-Langmuir의 전류방정식으로서 고진공 내에서 적용되며 각 상수와 관계식에 의해 (12)식으로 정리된다 [12].

$$j = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left(\frac{2q}{m} \right)^{1/2} \frac{V^{3/2}}{Sh^2} \quad (11)$$

$$j = 3.42 \times 10^{11} \frac{E^{0.5} P^{0.25}}{M^{0.5} K_0^{0.5}} \quad (12)$$

2-2-5-2. 이온당 평균 에너지(U_{avg})

한 이온이 sheath를 통과해서 Si 기판에 입사할 때 갖는 평균 운동에너지, U_{avg} ,는 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} U_{avg} &= \frac{e_{sum}(m a Sh)}{N_{ion}} \\ &= \frac{e_{sum}}{N_{ion}} (q E Sh) \\ &= 3.85 \times 10^{-23} \frac{E K_0 e_{sum}}{P^{0.5} N_{ion}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{여기서, } a = \frac{qE}{m}, e_{sum} = \sum_{n=1}^{N_{ion}} e_n = \sum_{n=1}^{N_{ion}} \frac{e_{LK,n}}{e_{max}}$$

위에서 e_{max} 는 이온이 한번의 충돌도 없이 sheath를 통해 기판에 입사할 때의 에너지이고 $e_{LK,n}$ 는 실제로 충돌을 거쳐 입사한 이온의 에너지이다. 고전역학에 의해 유도하면 e_{max} 는 m, a, Sh 의 곱이라는 것을 알 수 있다. e_n 는 $e_{LK,n}$ 를 e_{max} 로 정규화한 값이므로 이온이 가질 수 있는 e_n 의 최대값은 1이다. N_{ion} 은 sheath 내로 들어오는 이온의 총 갯수이고 e_{sum} 은 N_{ion} 개의 이온이 각각 기판에 입사할 때 갖는 e_n 를 합산한 값이다. 그러므로 e_{sum}/N_{ion} 은 입사하는 이온 한 개가 가지는 평균 정규화 에너지이다.

2-2-5-3. 에너지 Flux(J)

1초당 Si 기판 1 cm^2 위로 입사하는 이온의 에너지 Flux, J ,는 $j \times U_{avg}$ 로 나타낼 수 있고 이것을 정리하면 다음과 같다.

$$J = j U_{avg} = 1.31 \times 10^{-11} \frac{E^{2.5} K_0^{0.5} e_{sum}}{P^{0.25} M^{0.5} N_{ion}} \quad (14)$$

2-2-5-4. 에너지 수지식과 이온의 식각속도(R_{ion})

Si의 분해, 승화에너지가 42.2 kcal/mol 이고[13], Si의 밀도가 $8.2 \times 10^{-2} \text{ mol/cm}^3$ 임을 감안하면, 1 cm^2 의 Si을 깊이 $X \text{ cm}$ 까지 식각하는데 필요한 에너지는 $8.2 \times 10^{-2} X \times 42.2 = 3.46X \text{ kcal}$ 임을 알 수 있다. Si 기판 위에 입

Table 2. Etch rates reported in references

	Gas	Etch rate (Å/s)	Power (W/cm)	Pressure (mTorr)	Flow rate (sccm)	Reference
Plasma etching	CF ₄	8.3	0.38	600	30	[14]
	SF ₆	291.7	0.36	200	50	[15]
Reactive ion etching	CF ₄	15.0	1.30	20		[16]
		6.7	0.30	30	25	[17]
	SF ₆	40.0	1.67	50	43	[18]
		86.7	0.16	200	20	[15]

Table 3. Etch rates calculated according to derived correlations between process and internal variables for SF₅⁺/SF₆ system

E	P	50	100
100	R _{ion}	1.7	1.3
250		16.8	12.8
500		95.1	72.5
750		262.2	199.8
1000		538.2	410.1
	R _{neu}	163.6	280.0

사하는 이온의 운동에너지가 모두 Si의 분해에 기여한다고 가정하면(이 가정은 플라즈마 식각반응기구에 의하면 정확하지 않으나 1차 가정으로서는 충분하다. 이온식각속도의 절대값은 뒤의 4절에서 보인 것과 같이 실험결과에 대한 fitting에 의하여 수정이 가능하다.) 에너지 수지식을 세워 다음의 (15)식과 같이 이온에 의한 식각속도, R_{ion},의 관계식을 유도할 수 있다.

$$R_{ion} = 3.79 \times 10^{-4} \frac{E^{2.5} K_0^{0.5} e_{sum}}{P^{0.25} M^{0.5} N_{ion}} \quad (15)$$

2-3. 도출된 관계식의 검증

Table 2에는 각종 문헌에 보고된 식각속도의 실험치들을 기록하였다. 식각속도는 계마다 다르지만 6.7-291.7 Å/s의 범위에 있다.

이 연구에서 대상으로 한 두 가지 계 중 SF₅⁺/SF₆계의 경우에 대하여, 통상적인 플라즈마 식각반응기의 전기장 세기가 100-1000 V/cm라는 것을 염두에 두고 위에서 유도한 관계식들을 사용하여 식각속도를 계산해 보면 Table 3과 같다.

Table 3의 식각속도들은 10만개의 이온을 발생시켜 계산한 값이며 이온 한 개당의 평균 정규화 에너지, e_{sum}/N_{ion},는 압력이 50 mTorr일 때 0.78066, 100 mTorr일 때 0.70725였다.

Table 2의 plasma etching에서는 이온의 물리적 식각보다 중성입자의 화학반응에 의한 식각이 더 우세하

므로 그 실험치들을 Table 3의 R_{neu}와 비교하고, 마찬가지로 Table 2의 reactive ion etching에서는 이온 식각이 더 우세하므로 Table 3의 R_{ion}과 비교하는 것이 타당하다. 이러한 비교를 통해 Table 3의 식각속도 계산치들이 문헌에 보고된 실험치들과 크기자리수 범위 내에서 일치함을 알 수 있다.

또, Table 3에서 압력이 감소하고 전기장의 세기가 증가할수록 R_{ion}이 증가하고, 압력이 증가할수록 R_{neu}가 증가하는 경향을 볼 수 있는데 이것은 실제의 경향과 일치하는 것이다.

이러한 비교, 검토로부터 앞에서 유도한 관계식이 실제공정에 적용하기에도 비교적 적절하다고 볼 수 있다.

3. 식각실험

3-1. 실험조건 및 공정

앞에서 도출한 관계식을 SF₆계나 CF₄계가 아닌 다른 공정계에 대해서도 적용할 수 있는지를 알아보기 위하여 Cl₂를 주식각원으로 사용하여 실리콘의 식각실험을 수행하였다. 플라즈마 식각반응기는 LRC사의 R-4400이었다.

모든 실험에 대하여 He 200 sccm, Cl₂ 120 sccm, HBr 60 sccm의 동일한 반응물과 조성을 사용하고, 그 대신 반응물의 전체압력과 플라즈마전력을 변화시켜 다양한 식각단면을 얻었다. 여기서 He은 희석제로 쓰였는데 이것은 식각원(etchant) 기체들이 골고루 분산되어 wafer 전체의 식각 균일도를 좋게 하기 위한 것이다. Cl₂는 주식각원으로서, 벽면에 흡착해 있다가 입사하는 전리 이온 Cl⁺의 에너지를 받아서 식각 반응을 한다. HBr은, 그 반응기구가 확실히 밝혀지지는 않았으나 다른 기체나 산화물과 반응하여 고분자를 생성하고 이것이 식각도량의 벽에 흡착되어 보호막(passivation film)을 형성하는 것으로 알려져 있다.

마스크는 TEOS(tetraethyl orthosilicate)를 1000 Å 증착시킨 것이고 식각한 후에는 BOE(buffered oxide

Table 4. Etch rates measured from experiments

		unit: [$\text{\AA}/\text{s}$]					
Pressure	Power	100 W		250 W		400 W	
		Sample no.	Etch rate	Sample no.	Etch rate	Sample no.	Etch rate
200 mTorr		#1	(5.6)	#6	83.3	#7	151.3
350 mTorr		#2	6.9	#5	31.25	#8	140.2
500 mTorr		#3	6.25	#4	8.3	#9	100.0

etchant)로 제거하였다. BOE는 실리콘에 영향을 주지 않는다. 실리콘 기판과 마스크와의 선택도는 30대 1이므로 실리콘이 식각될 동안 마스크의 식각은 무시될 정도로 작다.

3-2. 실험결과

플라즈마 반응기의 전력을 100, 250, 400 W로, 압력을 각 전력에 대하여 200, 350, 500 mTorr로 각각 변화시켜

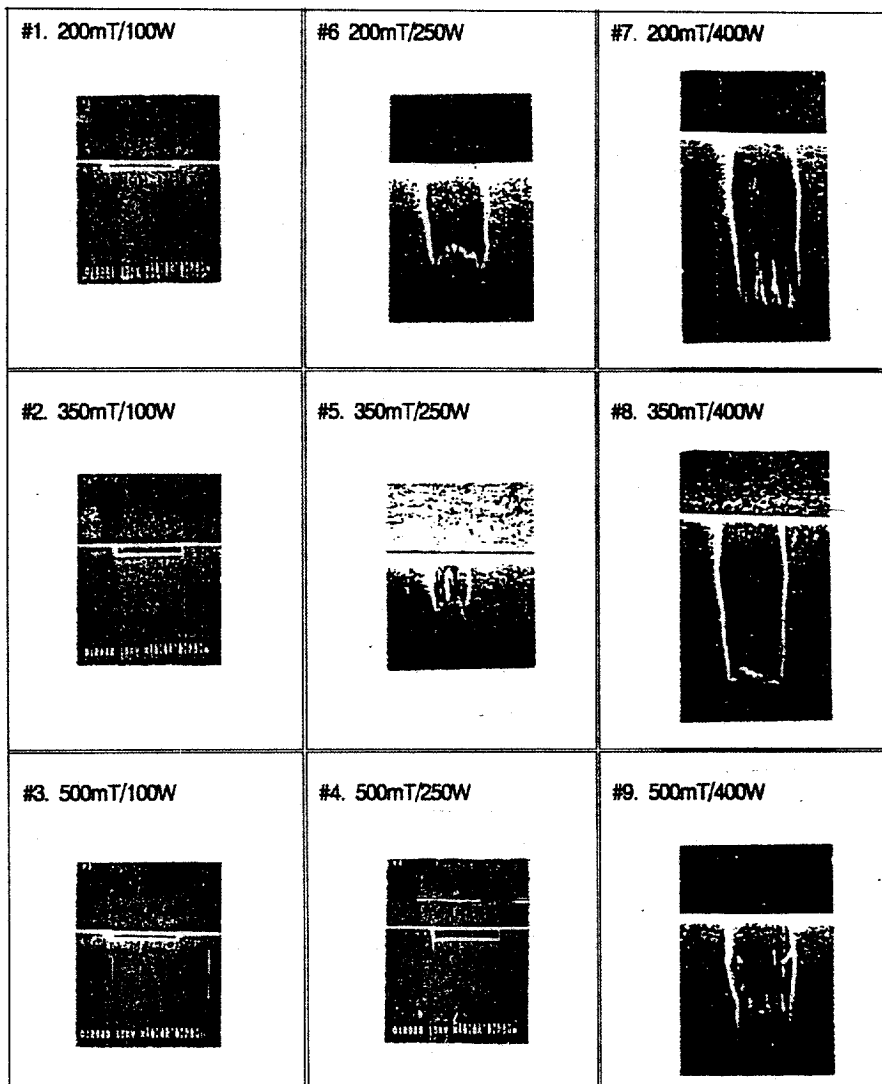


Fig. 1. Etch profiles obtained under various conditions(Flow rate[sccm] : 200 He/120 Cl_2 /60 HBr, Etch time : 3 min, Mask : TEOS 1000 \AA).

가면서 모두 9가지의 공정조건 하에서 실험하였다. 이때 얻어진 식각단면으로부터 식각속도를 측정하여 표로 나타낸 것이 Table 4이다. Fig. 1은 3분간 식각한 실험 결과를 Table 4와 같은 순서로 동일 축척하에서 배열한 것이다. 이 9장의 SEM(scanning electron microscopy) 결과는 #1을 제외하면, 압력이 증가할수록 식각속도가 감소하고 전력이 증가할수록 식각속도가 증가하는 경향을 보이고 있다. #1의 실험결과는 전체와의 경향성이 맞지 않아서 실험이 잘못된 것으로 간주하고 이후의 비교 대상에서 제외하였다.

#5-#9에서 식각단면의 밑부분(bottom)에 black silicon이라는 거친 표면을 볼 수 있는데, 이것은 식각장치의 고장에 따른 수리기간이 길어져서 마스크를 입힌 후 곧 식각실험을 수행하지 못함에 따라 그 사이 얇은 산화막(native oxide)이 부분적으로 자랐기 때문이다.

4. 실험결과와 전산모사결과의 비교 분석

4-1. 관계식의 활용

실험이 수행된 계는 앞에서 문헌으로부터 공정변수의 관계식을 도출한 계와는 다르므로 본 실험결과를 모사할 때 위의 관계식을 그대로 쓸 수는 없다. 그러므로 관계식의 골격은 그대로 두되 여기에 사용된 계수와 지수는 실험한 계에 알맞게 새로이 계산하거나 논리적으로 실험결과에 fitting을 해서 결정해야 한다.

Fig. 2에는 공정변수 P(압력), W(전력)와 각 내부변수 간의 관계식을 나타내고, fitting할 매개변수 C_1 , $\{C_2, M, N\}$, C_3 를 나타내었다. C_1 은 이온분포와 관계가 있으며 식각단면의 bowing 정도를 결정하는 매개변수이다. $\{C_2, M, N\}$ 은 이온의 식각속도를 결정하는데, 세 수치를 한데 묶은 것은 이들 수치가 실험결과에 대한 fitting과정에서 최소자승법(least squares method)에 의하여 함께 결정되기 때문이다. C_3 는 이온의 glancing 기준각도로서 식각도랑 밑면의 trenching 정도를 결정한다. 이 매개변수들은 실험이 수행된 계의 성격을 규정하는 값들로서, 아래에 설명한 바와 같이 실험결과에 대한 fitting 작업을 통하여 $\{C_2, M, N\}$, C_1 , C_3 의 순서로 결정하였다.

Fig. 2에서 R_{neu} 를 0으로 놓은 이유는 이 연구의 실험에서는 식각도랑의 벽이 고분자막으로 보호가 되어 있어서 중성입자에 의한 순수한 화학반응은 거의 없다고 볼 수 있기 때문이다. (15)식에서는 R_{ion} 을 E(전기장)와 P(압력)의 함수로 유도했는데 Fig. 2에서 W(전력)와 P(압력)의 함수로 놓은 이유는 실제 공정에서는 E보다는 주로 W를 사용하며 E와 W는 비례관계에 있기 때문이다. 이온의 평균자유행로(λ)는 기체운동론에 따라 앞

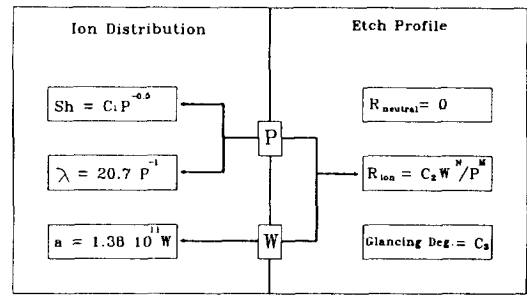


Fig. 2. Correlations between process and internal variables.

에서 유도한 관계식을 그대로 사용했고, 이온의 가속도(a)는 Cl^+ 에 대하여 새로이 계산하여 사용했다.

4-2. 계수와 지수의 결정

관계식의 계수와 지수를 결정하기 위한 fitting 작업의 대상으로서 #6, #7, #9의 실험결과를 사용했는데, 그 이유는 이들의 식각단면이 비교적 뚜렷한 경향성을 띠고 있고 bowing, trenching 등의 식각 특징을 모두 가지고 있어서 매개변수의 fitting에 유용하기 때문이다. 앞에서 관계식을 유도한 논리에 따르면 식각속도는 다음 식(16)과 같은 경향성을 가진다고 볼 수 있다.

$$R_{ion} = f(P, W) = C_2 \frac{W^N}{P^M} \quad (16)$$

R_{ion} 의 관계식을 (16)식과 같이 설정하고 실험에서 얻어진 식각속도를 가장 잘 만족시키는 $\{C_2, M, N\}$ 의 값을 최소자승법으로 구하면 다음의 (17)식이 얻어진다. 즉, $\{C_2, M, N\}$ 의 값을 $\{0.0051, 0.53, 2.2\}$ 로 결정하였다.

$$R_{ion} = 0.0051 \frac{W^{2.2}}{P^{0.53}} \quad (17)$$

다시, 최적의 C_1 과 C_3 값을 구하기 위해 이들의 값을 조금씩 변화시켜가며 #6, #7, #9의 각 실험결과에 fitting을 하면, C_1 이 $1.265 \text{ cm mTorr}^{-0.5}$ 이고 C_3 가 20도일 때 실험단면과 모사단면의 모양과 크기가 가장 잘 맞았다. 즉, fitting 작업에 의하여 구한 sheath 두께의 관계식과 glancing 기준각도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Sh &= 1.265 P^{-0.5} \\ \text{Glancing 기준각도} &= 20^\circ \end{aligned} \quad (18)$$

4-3. 모사결과와 실험결과의 비교

앞에서 결정한 관계식을 써서 실험조건의 모든 범위에 대하여 전산모사하고 그 결과를 모든 실험결과와

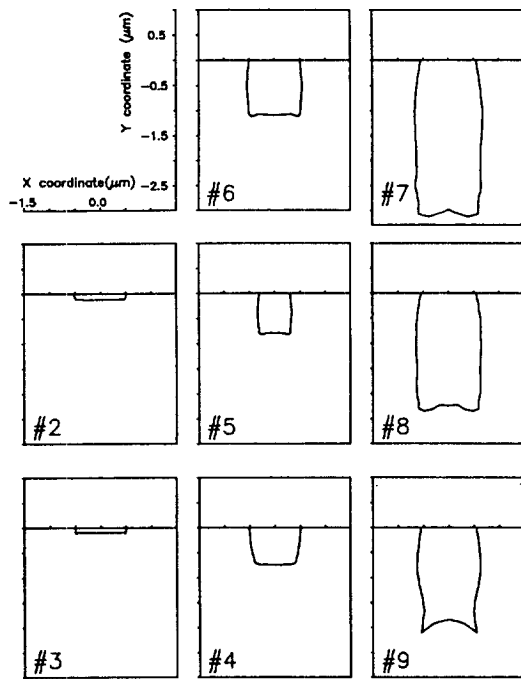


Fig. 3. Simulation of etch profiles obtained under various experimental conditions. The experimental conditions are given in Table 4.

비교한 것이 Fig. 3에 표시되었다. 최대오차는 #4 실험에서 보이는데 실험의 식각속도는 8.3 \AA/s 이고, (17) 식에서 구한 식각속도는 35.75 \AA/s 이다. 이 차이는 (17) 식을 최소자승법으로 구하는 과정에서 나온 최대오차에 해당된다. #4 실험에서 차이가 나는 것을 제외하면 Fig. 4의 모사식각단면들은 Fig. 1의 실험결과와 비교할 때 식각 깊이, 벽면의 bowing 현상, 밑면의 trenching 현상 등이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

5. 결 론

(1) 지금까지의 플라즈마 식각단면 모사는 주로 내부변수에 의한 것이었으나 본 연구에서는 내부변수와 공정변수의 관계식을 문헌의 실험자료와 물리, 화학적인 이론에 근거하여 도출하였다. 이 관계식에 의하여 공정변수인 압력과 전력에 따라 모사한 식각단면의 결과는 실제의 경향과 일치하였다.

(2) $\text{Cl}_2/\text{HBr}/\text{He}$ 계의 실험을 압력과 전력을 바꾸어 가며 수행하였고 위에서 도출한 관계식 중 계에 대한 의존도가 큰 계수와 지수를 세 개의 실험조건에 대한 식각단면 결과에 fitting하여 구했다. 이렇게 하여 결정된

관계식을 이용하여 다시 모든 실험조건에 대해 식각단면을 모사했을 때 실험결과와 비교적 잘 일치하는 모사결과를 얻었다.

(3) 식각의 결과로 얻어진 식각단면의 모양으로부터 parameter fitting 방법에 의하여 관계식의 계수와 지수 값을 구함으로써, 다른 실험조건에서 얻어진 식각단면 까지도 비교적 정확히 예측할 수 있는 전산모사기를 개발하였다.

감 사

이 연구는 초고집적반도체기술(차세대기억소자) 공동개발사업으로 수행되었는 바, 그 동안의 지원에 감사를 드립니다.

사용기호

- a : acceleration of ion [cm/s^2]
- $e_{I,K,n}$: kinetic energy of n -th ion
- e_n : $e_{I,K,n}$ normalized by e_{max}
- e_{max} : maximum $e_{I,K,n}$ without any collision with neutrals
- e_{sum} : sum of e_n for $n=1-N_{ion}$
- E : electric field [V/cm]
- j : ion flux on Si substrate [$\#/\text{cm}^2\text{s}$]
- J : energy flux on Si substrate [$\text{kcal}/\text{cm}^2\text{s}$]
- K_0 : proportional constant relating Sh and P
- m : ion mass [g]
- M : molecular weight
- N_{ion} : total number of ions generated in simulation
- N_F : Fluorine concentration [$\#/\text{cm}^3$]
- N_g : gas concentration [$\#/\text{cm}^3$]
- P : pressure [mTorr]
- q : electric charge [C]
- R_{ion} : etch rate by ions [\AA/s]
- R_{neu} : etch rate by neutrals [\AA/s]
- Sh : sheath thickness [cm]
- T : temperature of gas pressure [K]
- U_{avg} : average kinetic energy of an incident ion [kcal]
- V : electric potential difference of sheath [V]
- W : electric power [Watt]

그리이스 문자

- ϵ_0 : dielectric constant of free space, 8.86×10^{-14} [farad/cm]
- λ : mean free path [cm]
- σ : collisional cross-section of ion in gas [cm^2]

참고문헌

1. Antoniadis, D. A. and Dutton, R. W.: *IEEE Trans. Electron Devices*, **26**, 490(1979).
2. Oldham, W. G., Neureuther, A. R., Sung, C., Reynolds, J. L. and Nandgaonkar, S. N.: *IEEE Trans. Electron Devices*, **27**, 1455(1980).
3. Pack, R. and Thurgate, T.: DEPICT and DEPICT-2. Users Manual(Technology Modeling Associates Palo Alto, CA, 1988).
4. Lorentz, J., Pelka, J., Ryssel, H., Sachs, A., Seidel, A. and Svoboda, A.: *IEEE Trans. Computer Aided Design*, **4**, 421(1985).
5. Kushner, M. J.: *J. Appl. Phys.* **58**, 4024(1985).
6. Thompson, B. E., Sawin, H. H. and Fisher, D. A.: *J. Appl. Phys.*, **63**, 2241(1988).
7. 한재현, 조병옥, 정찬화, 문상흠: 화학공학, **32**(3), 431(1994).
8. Mutsukura, N., Kobayashi, K. and Machi, Y.: *J. Appl. Phys.*, **68**, 2657(1990).
9. Ulacia-Fresnedo, J. I. and McVitte, J. P.: *J. Appl. Phys.*, **65**, 1484(1989).
10. Flamm, D. L.: *J. Appl. Phys.*, **52**, 3633(1981).
11. Ninomiya, K., Suzuki, K., Nishimatsu, S. and Okada, O.: *J. Appl. Phys.*, **58**, 1177(1985).
12. Chapman, B.: "Glow Discharge Process", John Wiley & Sons(1980).
13. Morgan, R. A.: "Plasma Etching in Semiconductor Fabrication", Elsevier(1985).
14. Mader, H.: "Plasma Processing", Electrochem. Soc., Pennington, p. 125(1981).
15. Eisele, K. M.: *J. Electrochem. Soc.*, **128**, 123(1981).
16. Hosokawa, N., Mutsusaki, R. and Asawaki, T.: *Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. 2 pt1*, 435(1974).
17. Bondur, J. A.: *J. Vac. Sci. Technol.*, **13**, 1023(1976).
18. Mauer, J. L., Logan, J. S., Zielskin, L. B. and Schwarz, G. C.: *J. Vac. Sci. Technol.*, **15**, 1734(1978).