

## 실험계획법에 의한 CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 플라즈마 에칭공정의 최적화에 관한 연구

최만성<sup>†</sup> · 김광선

<sup>†</sup>한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

## Experimental Analysis and Optimization of CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> Plasma Etching Process

Man Sung Choi<sup>†</sup> and Kwang Sun Kim

<sup>†</sup>School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

### ABSTRACT

This investigation is applied Taguchi method and the analysis of variance(ANOVA) to the reactive ion etching(RIE) characteristics of SiO<sub>2</sub> film coated on a wafer with CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> mixture. Plans of experiments via nine experimental runs are based on the orthogonal arrays. A L<sub>9</sub> orthogonal array was selected with factors and three levels. The three factors included etching time, RF power, gas mixture ratio. The etching rate of the film were measured as a function of those factors. In this study, the etching thickness mean and uniformity of thickness of the RIE are adopted as the quality targets of the RIE etching process. The partial factorial design of the Taguchi method provides an economical and systematic method for determining the applicable process parameters. The RIE are found to be the most significant factors in both the thickness mean and the uniformity of thickness for a RIE etching process.

**Key Words** : Reactive Ion Etching, Taguchi Method

### 1. 서 론

반도체 제조기술은 곧 집적도의 경쟁이며 집적도는 Lithography Technology가 중심이 되고 노광장비와 함께 에칭장비가 중요하다. 초고집적 공정에서 플라즈마(plasma)를 이용한 건식에칭이 필수적이며 반응성 이온 에칭(RIE, reactive ion etching) 장비가 주로 사용되고 있으나 손상(damage) 등의 향상을 위하여 많은 연구가 진행되고 있다[1-3]. 건식화 관점에서 시작된 반도체 제조공정의 플라즈마 공정은 1969년 경 열적공정보다 더 좋은 결과를 저온에서 얻기 위한 시도로부터 시작되어 1970년도 후반에 이르러 산화, 에칭, CVD, EPI 등의 중요한 반도체 공정기술로 실용화하게 되었다. 한편 최근에는 CVD나 PVD에 의해 경질피막이 증착된 공구가 다양해짐에 따라 그 증착상태가 불량한 피막을 다시 제거하는 공정도 필요하게 되었다. 이러한 불량품의 처리 방법으로는 습식에칭법과 건식에칭법을 사용

한다. 습식법은 모재의 종류에 따라 제한이 있고 환경 오염이 심한 단점이 있다. 건식법 중에는 용융아연을 이용한 소재분해법과 피막만을 제거하는 플라즈마 반응에칭법 및 스퍼터 에칭법 등이 있다. 본 연구에 적용된 플라즈마 반응에칭법은 습식에칭에 비해 비교적 환경오염이 적고 균일하게 에칭할 수 있는 장점이 있다. Si, SiO<sub>2</sub>, 포토레지스터와 같은 반도체 재료의 에칭에는 회로선 폭이 좁은 곳에서도 비등방성(anisotropy) 에칭이 필요하다. 따라서 화학적 건식에칭(chemical dry etching)보다는 반응성 이온에칭과 같은 공정이 주로 이용된다. 플라즈마를 이용한 반응성 이온에칭기술은 높은 에칭속도, 비등방성 에칭을 할 수 있을 뿐 아니라 반응성 이온으로 인한 화학적 영향(chemical effect)으로 인해 높은 에칭 선택성을 가질 수 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 실제 산업에 있어서도 대부분 이 기술이 적용되고 있다. 그러나 내열금속(refractory metal)의 우수한 물성을 활용할 수 있는 높은 가능성에도 불구하고 에칭가스계(etching gas system)들과 이들의 반응에 대한 공정의 체계적인 연구가 거의

<sup>†</sup>E-mail : mschoi@kut.ac.kr

이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 현재 많이 활용되고 있는 실험계획법 중의 하나인 Taguchi법을 이용하여 에칭가스계의 파라미터인 에칭 시간, RF power,  $CF_4/O_2$ 의 가스혼합비들의 요인이 에칭량과 균일도에 미치는 영향을 알아보았다.

## 2. 실험계획법

### 2.1. Taguchi법의 개요

많은 변수들에 의하여 지배되는 복잡한 현상이 있을 때 각 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 알기 위해서는 다양한 변수의 조합에 대하여 실험을 수행하여야 한다. 또한 변수의 조합은 실험으로부터 얻어지는 분석결과와 신뢰성을 확보하기 위하여 신중하게 선택되어야 한다. 다구찌 이전의 실험계획법에서는 총 변수조합(full factorial)에 대한 실험을 선택하였고 변수조합이 실험결과를 왜곡시키지 않게 하기 위하여 직교배열표를 이용하였다. 이런 총 변수조합방식은 그 숫자가 매우 많게 되어 실험의 횟수가 방대하게 된다. 이러한 문제에 대하여 다구찌는 직교배열표를 이용해서 각 변수의 영향을 분석하는 방법을 제안하였다. 이 방법에 따르면 총 변수조합에 비하여 현저히 감소된 실험만으로 각 변수의 영향을 확인할 수 있게 되었다. 또한 변수들을 현실적으로 제어가 가능한 제어변수와 제어가 어려운 잡음변수로 구분하여 최적 제어변수의 조합을 찾는 방법을 제안하였다. 이는 복잡한 통계이론을 통하여 잡음변수의 영향을 차단하고자 하는 종래의 실험계획법에 비하여 훨씬 더 이해하기 쉽고 현실적인 방안으로 받아들여지고 있으며 강건설계(robust design)의 기본적인 수단을 이루고 있다. 강건설계는 제품의 사용환경, 작업자의 숙련도, 소비자의 수준 등과 같은 잡음변수의 영향 하에서 생산 및 소비 비용이 최소화된 제품을 최단 시간에 시장에 공급하는 것을 목적으로 한다. 다구찌법은 제품의 개발 초기 단계에서 각 설계변수의 영향을 신속하게 파악하고 발생 가능한 문제를 예방하는 수단을 제공하므로 강건설계의 유력한 수단이 되었다.

### 2.2. S/N비

Taguchi기법의 목적은 잡음에 강한 설계를 하는 것이다. 생산현장은 재료의 다양함, 작업자의 부주의, 통제 불가능한 외부환경 등이 있다. 따라서 Taguchi기법은 잡음의 영향을 최소화하고 제어 가능한 영향력이 강한 인자를 찾아내어 잡음의 영향력을 최소화하는 강건설계(robust design)가 핵심이다. 이러한 강건설계에

필요한 기법이 S/N(signal and noise)비이다. 특성치가 적으면 적을수록 좋은 망소특성인 경우의 S/N(signal to noise)비는 식(1)과 같다.

$$SN = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

그리고 특성치가 크면 클수록 좋은 망대특성인 경우의 S/N비는 다음 식(2)와 같다.

$$SN = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (2)$$

## 3. 실험장치 및 방법

본 연구에 사용된 장비는 플라즈마마트사의 것으로 Photo 1과 같다.



Photo 1. RIE equipment.

사용된 박막두께측정기는 K-MAC사에서 제조한 것으로 모델명은 ST-2000이다. 에칭가스로는  $CF_4$ 와  $O_2$  가스를 사용하였다.  $CF_4$  가스는 반도체나 금속 등을 에칭하는데 주로 사용되며,  $O_2$ 는 에칭속도를 증가시키는데 사용된다. 에칭두께는 박막두께측정기를 이용하여 에칭한 두께의 감소량을 측정해 분석하였다. 균일도(uniformity)의 값은 박막두께측정기에 의해 측정되어진다. 플라즈마장치는 진공 챔버, RF 전원공급장치(RF power supply), 가스분배시스템, 압력제어시스템 등으로 구성되어 있다. 반응성 이온에칭 장치에 있어서 에칭의 특성은 장치에 영향을 많이 받는데 주로 배기계, 압력과 유량, 전극구조, 고주파 전력 등이다.

실험에 사용된 시편은 Fig. 1의  $SiO_2$ 의 산화막이 있는 지름 4인치의 웨이퍼를 사용하였고 각 기호는 웨이

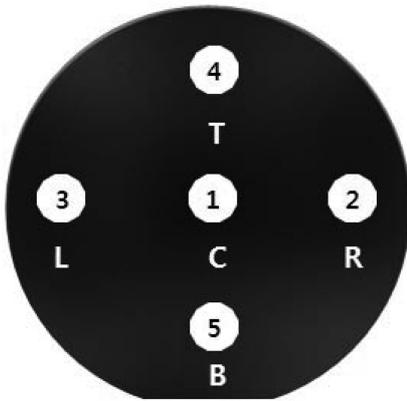


Fig. 1. Measured points of the wafer.

퍼의 각 측정부위를 나타낸 것이다. Taguchi의 실험계 획순서에 따라 Table 1과 같은 A, B, C인자가 3개인, 3수준의 L<sub>9</sub> 실험을 하였다. 여기서 제어인자 A는 에칭 시간 [sec], B는 상하부 RF power[W], C는 CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> [sccm/sccm]의 혼합가스비이다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

Table 2는 Table 1에 따라 실험한 결과 A, B, C의 제 어인자에 의한 에칭두께와 균일도(uniformity)에 대한 실험값을 나타낸 것이다. 각 측정점 별로 2회 반복실험 하여 에칭 두께와 균일도를 각각 구하였다.

Fig. 2는 Table 2의 자료를 근거로 웨이퍼 각 위치에 따른 A, B, C의 제어인자에 따른 특성치인 산화막의 에칭량을 통계적으로 분산분석(ANOVA, analysis of variation)하고 유의확률 p-값(p-value)을 구하여 그림으 로 나타낸 것이다. 여기서 S/N비는 산화막의 제거량이 크면 클수록 좋은 망대특성으로 구하였다. 유의확률 p-값은 귀무가설 H<sub>0</sub>가 참일 때, 관측된 검정통계량 값을 벗어나는 극단값이 나올 확률이다. 즉 관측된 검정통계 량 값을 근거로 H<sub>0</sub>를 기각할 수 있는 최소의 유의수준

Table 1. Values of levels of selected parameters in this experiment

Factor	A Etching time[sec]	B Upper/lower RF power[W]	C CF <sub>4</sub> /O <sub>2</sub> (sccm/sccm)
Level 1	60	200/50	30/0
Level 2	120	300/70	30/2
Level 3	180	400/90	30/4

을 말한다. 미리 정해놓은 유의수준 α값보다 p-값이 더 크다면 H<sub>0</sub>는 기각되지 않는다. Fig. 2에서 A와 B는 5% 유의수준에서 매우 유의하고, C는 10% 유의수준 에서 유의하다. 여기서 C의 p-값이 일정하지 않은 것 은 혼합가스의 열유동 현상에 의한 영향으로 생각된다. 또한 특성치인 산화막의 에칭량에 가장 많이 영향을

Table 2. The L<sub>9</sub> experimental results

Outer array					
Removed film thickness of SiO <sub>2</sub> [Å] (repeated experimental values)					Uni.
Pt. 1	Pt. 2	Pt. 3	Pt. 4	Pt. 5	
475.88	468.31	471.89	469.34	478.78	0.3
1043.26	541.51	527.18	527.6	545.64	0.27
998.61	993	994.44	967.55	1007.69	0.07
1114.32	1080.55	1121.1	1088.41	1107.71	0.32
1417.52	1430.25	1425.29	1397.42	1468.42	0.19
1476.85	1504.27	1437.89	1493.19	1473.33	0.49
1342.44	1315.9	1344.7	1311.63	1342.18	0.19
1406.28	1397.94	1377.93	1379.29	1415.43	0.21
2296.24	2262.63	2206.47	2265.64	2276.9	1.85
2329.5	2369.14	2329.5	2307.39	2352.66	2.25
2582.43	2550.28	2581.9	2554.38	2588.12	0.41
2618.7	2625.93	2645.31	2595.57	2645.08	0.57
2533.01	2528.85	2507.56	2511.07	2528.19	0.59
2692.72	2667.97	2638.41	2639.77	2642.63	1.53
2999.8	2962.78	3002.68	2924.34	2986.73	1.09
3048.03	2991.39	3024.81	2965.52	3004.59	2.66
4789.99	5000.16	4974.29	4881.41	5013.67	1.11
4789.99	5000.16	4974.29	4881.41	5013.67	1.11

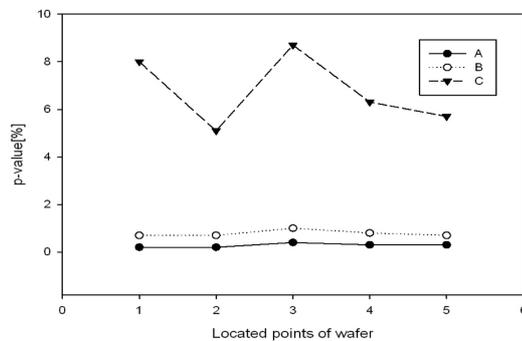


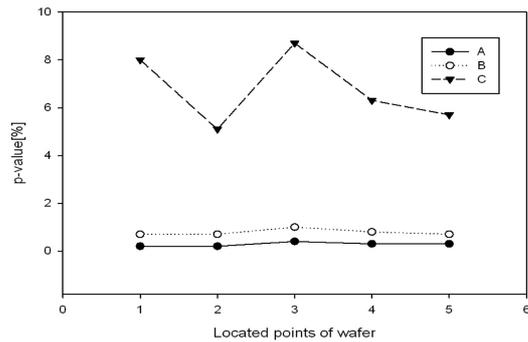
Fig. 2. p-value with located points of the wafer.

미치는 제어인자로는 A, B, C 순임을 알 수 있다. Table 3은 Table 2의 자료에서 웨이퍼의 모든 측정점의 에칭량을 대상으로 하여 분산분석한 결과이다.

Table 3에서 p의 값을 살펴보면 5% 유의수준에서 에칭시간 A와 상하부 RF power B는 매우 유의하고, 10% 유의수준에서 혼합가스의 량 C는 유의하다. 이것은 Fig. 2의 결과와 매우 유사함을 보여준다.

**Table 3.** ANOVA analysis for SiO<sub>2</sub> film thickness of the wafer

Factor	df	SS	MS	F	P
A	2	192.346	96.173	380.91	0.003
B	2	68.449	34.224	135.55	0.007
C	2	7.799	3.900	15.44	0.061
Residual	2	0.505	0.253		
Total	8	269.098			



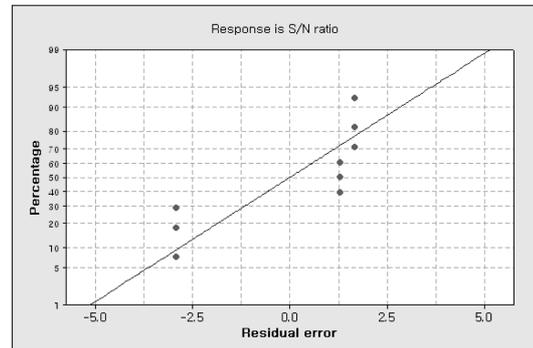
**Fig. 3.** S/N ratios for removed etching thickness.

Fig. 3은 S/N비의 주효과 플롯을 나타낸 것으로 C인자를 제외하고 나머지 인자들은 반응변수에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있고 S/N비가 큰 조건을 찾으면 최적조건은 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>이다. 이 설계변수의 최적수준은 S/N비를 최대로 하는 수준이다. 제어인자가 균일도에 미치는 영향을 알아보기 위해 Table 2의 자료를 근거로 균일도에 대한 자료를 분산분석한 결과가 Table 4이다. Table 4에서 알 수 있듯이 10% 유의수준에서 균일도에 특별히 민감하게 영향을 미치는 인자는 없는 것으로 나타났지만 에칭시간 A는 고려해야 할 인자로 간주된다.

Fig. 4는 균일도에 관련된 자료의 잔차의 정규확률분포를 보여준다. 대체적으로 정규분포를 만족함을 알 수 있다. 여기서 잔차의 정규확률그림이 거의 직선으로 그려졌다고 보이므로 회귀모형이 맞다고 할 수 있다.

**Table 4.** ANOVA analysis for uniformity of the wafer

Factor	df	SS	MS	F	P
A	2	274.77	137.39	7.01	0.125
B	2	91.30	45.65	2.33	0.300
C	2	103.42	51.71	2.64	0.275
Residual	2	39.18	19.59		
Total	8	508.68			



**Fig. 4.** Normal probability plot.

## 5. 결 론

실험에 사용된 플라즈마마트사의 반응성 이온에칭 (RIE, reactive ion etching) 장비를 이용하여 4인치 웨이퍼를 건식에칭하고, 이 장비의 제어인자인 에칭시간, 상하부전압, CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>의 가스혼합비가 특성치인 에칭량 및 균일도에 미치는 영향을 구하였다. 실험한 결과 에칭시간, 상하부전압이 에칭위치에 따른 에칭량에 미치는 영향은 거의 없으나, CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>의 가스혼합비는 각 웨이퍼 위치의 에칭향에 큰 영향을 주었다. 제어인자가 에칭량에 미치는 영향은 에칭시간, 상하부전압, CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>의 가스혼합비 순으로 나타났다. 그리고 에칭량을 최대화하는 조건은 본 장비에서 에칭시간180(sec), 상하부전압400/90[W], CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>의 혼합가스비는 30/4[sccm/sccm]이다. 균일도에 민감하게 영향을 크게 미치는 인자는 없으나 에칭시간은 고려해야 할 인자이다.

## 참고문헌

1. P.I.Matsuo, "Role of N<sub>2</sub> addition on CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> remote plasma chemical dry etching of polycrystalline silicon.", J. Vac. Sci. Technol., Vol 15(4), pp, 1801-1813, 1997.

- 
2. Michael A. Lieberman, "Principles of plasma discharges and materials processing", John Wiley & Sons, Inc. 1994.
3. W. T. Pike, W. J. Karl, S. Kumar, S. Vijendran, T. Semple, "Analysis of sidewall quality in through-wafer deep reactive-ion etching", *Microelectronic Engineering*, Volumes 73-74, pp. 340-345 2004.
- 
- 접수일: 2009년 9월 14일, 1차 심사일: 2009년 10월 6일  
2차 심사일: 2009년 8월 31일, 게재확정일: 2009년 9월 15일