

논문 19-12-2

# 플라즈마 식각에 의하여 실리콘 표면에 유기된 불순물 오염의 분석 및 제거

## Analysis and Reduction of Impurity Contamination Induced by Plasma Etching on Si Surface

조선희<sup>1</sup>, 이원종<sup>1,a</sup>  
(Sun-Hee Cho<sup>1</sup> and Won-Jong Lee<sup>1,a</sup>)

### Abstract

Impurity contamination induced by CF<sub>4</sub> and HBr/Cl<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> plasma etching on Si surface was examined by using surface spectroscopes. XPS(x-ray photoelectron spectroscopy) surface analysis showed that F of 0.4 at % exists in the surface layer in the form of Si-F bonding but Br and Cl are below the detection limit (0.1~1.0 %) of the spectroscope. Static-SIMS(secondary ion mass spectrometry) surface analysis showed that the etched Si surface was contaminated with etching gas elements such as H, F, Cl and Br, and they existed to the depth of about 20~40 nm. The etched Si surface was treated with three different methods that were HF dip, thermal oxidation followed by HF dip and oxygen-plasma oxidation followed by HF dip. They showed an effect in reducing the impurity contamination and the oxygen-plasma oxidation followed by HF dipping method appears to be a little bit more effective.

**Key Words** : Plasma etching, Impurity contamination, Post-treatment, Static-SIMS

### 1. 서론

MOS기반의 집적회로의 집적도가 고도화되면서 지금까지 실리콘 웨이퍼 표면에 2차원 구조로 제작되어온 트랜지스터가 최근에 들어서는 입체적인 구조의 3차원 구조로 설계 및 제작되고 있다. 최근 들어 채널길이가 나노미터대로 축소되어감에 따라 threshold 전압, short channel 효과 그리고 채널 내부의 dopant의 불균일 문제 등이 더욱 중요해졌고, 이러한 문제를 해결할 수 있는 새로운 3차원 구조의 트랜지스터가 연구 개발되고 있다. 이러한 구조의 트랜지스터 제조 시 매우 미세한 패턴을 제작하기 위하여 플라즈마를 이용한 건식식각 공정이 수행되는데, 실리콘 및 실리콘산화막(SiO<sub>2</sub>)의

건식식각에는 일반적으로 halogen족 원소가 포함된 식각기체들이 사용되며 이 때 실리콘 기판 표면에 식각기체에 의한 불순물 오염이 발생하게 된다. 이들 불순물들이 실리콘 표면에 침투하여 결함들을 형성하고, 결정 구조를 변형시킬 수 있다. 이로 인해 누설전류 증가, 캐리어 이동도 감소 그리고 gate 산화막의 breakdown이 발생하는 등 반도체소자의 성능저하가 유발될 수 있다[1]. 따라서 플라즈마 식각 시 야기되는 표면오염에 관한 분석 및 제거가 요구된다.

일반적으로 제시되어온 실리콘 표면의 플라즈마 식각 손상을 제거하는 방법으로는 wet cleaning 처리, 산소 플라즈마 처리, 산화막 형성 후 제거 등이 있으며 이러한 후처리를 통해 식각 공정으로 인하여 저해된 전기적 성능을 어느 정도 향상시킬 수 있음이 보고되고 있다[2-7]. Kim 등은 C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>/H<sub>2</sub>로 실리콘산화막 식각 공정을 한 후에 산소 플라즈마 처리를 통해 F가 효과적으로 제거됨을 보고하였으며 또한 CHF<sub>3</sub>로 실리콘산화막 식각

1. 한국과학기술원 신소재공학과  
(대전시 유성구 구성동 373-1)  
a. Corresponding Author : wjlee@kaist.ac.kr  
접수일자 : 2006. 9. 18  
1차 심사 : 2006. 11. 7  
심사완료 : 2006. 11. 15

공정을 한 후에 산소 플라즈마 처리 및 HF vapor 처리를 통해 C, O, F 등의 불순물을 효과적으로 제거할 수 있음을 보고하였다[3,4]. 하지만 실리콘 산화막에 이어서 실리콘 기판을 할로젠족이 포함된 플라즈마로 연속적으로 식각한 후에 야기되는 불순물 오염과 여러 가지 제거 방법의 효과에 대해 정량적으로 보고한 것은 없다.

따라서 본 연구에서는 트랜지스터 제조 공정 시 수행되는 플라즈마 식각 공정에 의하여 발생하는 실리콘 표면의 불순물 오염을 표면분석법으로 분석하고 이들의 제거에 효과적인 방법을 제시하고자 하였다. 플라즈마 식각 손상은 주로 시편 표면층에서 발생하므로 이를 분석하기 위해서는 깊이 분해능이 우수한 AES(Auger electron spectroscopy), XPS(x-ray photoelectron spectroscopy), SIMS(secondary ion mass spectrometry) 등의 표면분석기기의 사용이 요구된다. 그런데 이러한 표면 분석기들의 측방향 분해능은 실제 고집적회로의 소자의 크기에 비해 최소 수십 배 이상 크므로, 플라즈마 건식식각 공정 시 실제 소자 표면에 발생한 불순물 오염을 이들 표면 분석기들을 이용하여 직접 분석하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 실제 트랜지스터 제작에서 적용되는 플라즈마 건식식각 방법으로 평판 실리콘 기판의 표면을 식각한 후 그에 따른 표면 불순물 오염을 여러 가지 표면분석법들을 이용하여 분석하였다. 또한 이들 불순물의 오염을 제거하는데 있어서 여러 가지 후 처리 공정들의 효과도 분석하였다.

## 2. 실험

3차원 트랜지스터의 제작방식은 여러 가지가 있지만, 대부분 실리콘산화막 및 실리콘의 식각공정이 포함된다. 본 연구에서 수행한 식각공정은 반도체 회사에서 실제로 사용하고 있는 식각공정조건을 참고로 하여 다음과 같이 수행하였다. 먼저 실리콘 웨이퍼 위에 열산화 방법을 이용하여 15 nm의 두께를 갖는 실리콘산화막을 형성시켰다. 이 산화막을 유도결합 플라즈마(ICP) 식각법으로 제거하였는데, 이때 식각기체로는  $CF_4$ 를 사용하였고 기판에는  $0.29 W/cm^2$ 의 바이어스를 가하면서 18초간 식각을 행하였다. 다음에 실리콘 표면을 유도결합 플라즈마 식각법으로 식각하였는데, 이때 식각기체로는  $HBr/Cl_2/O_2$ 를 사용하였고 기판에는  $1.2 W/cm^2$ 의 바이어스를 가하면서 18초간 수행하였다.

시편을 식각하는 과정에서 기관 표면에 각종 이온들의 충돌 현상에 의하여 표면거칠기가 악화될 수 있으므로 이를 확인하기 위하여 AFM(atomic force microscope)으로 표면거칠기를 측정하였다. 그 결과 식각공정 후 시편의 RMS(root mean square) 거칠기는 0.43 nm로서 본 연구에서 수행한 플라즈마 식각에 의해서는 표면거칠기가 악화되지 않음을 확인하였다.

플라즈마 식각에 의한 실리콘 표면의 불순물 오염은 매우 얇은 표면층에 존재할 것이라고 생각되므로, 깊이분해능이 우수한 표면조성 분석기기인 AES, XPS 및 static-SIMS를 이용하여 분석하였다.

실리콘은 산소와의 반응으로 표면에 치밀한 실리콘산화막이 형성된다. 이 산화막을 형성시킨 다음 제거시키면 식각공정 중 실리콘 표면에 오염된 불순물들도 이 산화막과 같이 제거될 수 있으리라 생각되었다. 따라서 본 연구에서는 다음 세 가지 방법으로 식각 후속 처리를 하여 표면 오염 불순물의 제거효과를 분석하였다: ① HF 처리, ② 열산화막 형성 후 HF 처리, ③ 산소 플라즈마에 의한 산화막 형성 후 HF 처리. 첫 번째 방법인 HF 처리는 별도의 실리콘산화막 형성 공정을 거치지 않고 플라즈마 식각공정 중 실리콘 표면에 생성된 산화막을 HF로 제거하는 방법이다. HF 처리 공정은 플라즈마 식각된 실리콘 시편을 DI water와 HF를 10:1로 혼합한 용액에 30분간 담가서 수행하였다. 두 번째 방법은 플라즈마 식각된 실리콘 시편을 800 °C에서 20 분간 열처리하여 15 nm 두께의 열산화막을 형성시킨 후 이 산화막을 HF 처리로 제거하였다. 세 번째 방법은 플라즈마 식각된 실리콘 시편을 유도결합 산소 플라즈마에 20 분간 노출시켜 표면에 10 nm 두께의 산화막을 형성시킨 후 이 산화막을 HF 처리로 제거하였다. 모든 시편들은 HF 처리 후 DI water에서 5 분간 세척 후 질소 기체로 건조시켰다.

## 3. 결과 및 고찰

첫 번째 표면 분석법으로서 AES를 사용하여  $CF_4$  및  $HBr/Cl_2/O_2$  식각기체를 이용하여 유도결합 플라즈마 식각공정을 거친 실리콘 시편들을 분석하였다. AES는 H, He를 제외한 모든 원소의 분석이 가능하고 분석속도가 빠르며 깊이분해능이 1.5~3 nm 정도로 우수하다. 또한 이온 스퍼터링 표면 식각을 이용하여 조성의 depth profile을 용이하게 얻을 수 있다. 하지만 원소분석한계가 0.1~1% 정도이므로 미량 원소의 분석에는 한계가 있다.

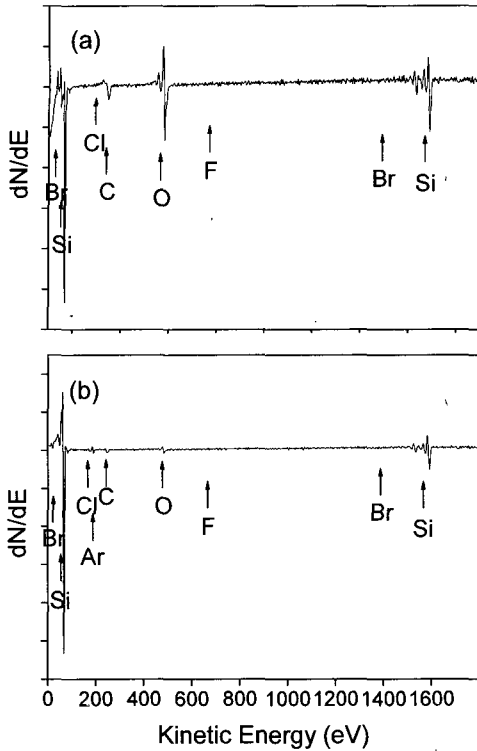


그림 1. 유도결합플라즈마 식각 후의 Si 표면의 AES 스펙트럼: (a) 식각 된 상태 (b) Ar 이온으로 18초간 스퍼터링 식각 후의 상태.  
 Fig. 1. AES spectra obtained from the ICP etched Si surfaces: (a) as-etched, (b) after sputter-etching by Ar ions for 18 sec.

본 연구에서 사용한 AES 분석기는 CMA (cylindrical mirror analyzer)를 장착한 SAM4300이다. 시편 분석 시 입사전자빔의 가속전압은 5 kV로 하였고, 전류는 300 nA로 하였다. AES depth profile을 얻기 위하여 입사전자빔의 가속전압은 2.0 kV, 전류 밀도는 30  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 조건으로 시편을 Ar 이온으로 스퍼터링 표면식각을 행하였으며 6초 간격으로 AES 분석을 수행하였다.

그림 1(a) 및 1(b)는 각각 유도결합 플라즈마 식각공정을 거친 시편의 표면 및 18초간의 이온 스퍼터링 표면식각 후의 AES 스펙트럼을 보여주고 있다. AES 스펙트럼에서 Si, O, C 피크를 식별할 수 있다. C 피크의 경우 플라즈마 식각 공정 시 실리콘 시편 표면에 잔류된 원소들과 식각 공정 후 대기로부터 흡착 된 hydrocarbon이 함께 분석된 것으로 판단된다. O 피크의 경우 18 초간의 Ar

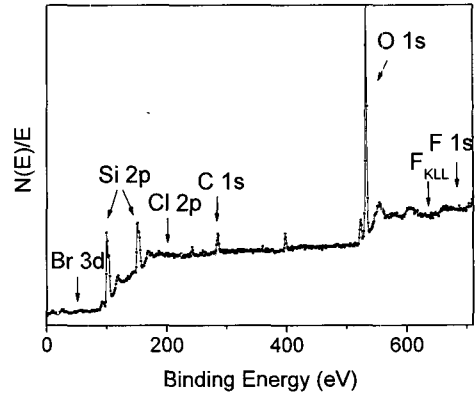


그림 2. 유도결합플라즈마 식각 후 Si 표면의 XPS 광역 스펙트럼.  
 Fig. 2. XPS wide spectrum obtained from the ICP etched Si surface.

이온 스퍼터링 표면식각 후 거의 제거됨을 볼 수 있는데, 이와 같이 O 피크가 크게 줄어드는 현상은 시편 표면에 형성된 표면 산화막이 Ar 이온에 의한 18 초간의 스퍼터링 표면식각으로 거의 제거됨을 의미한다. 그러나 F, Br, Cl과 같은 식각 불순물 원소들은 분석되지 않았다. 따라서 이들 불순물들은 설사 시편표면에 존재한다고 하더라도 AES의 원소분석한계(약 0.1~1.0 %) 이하의 미량으로 존재함을 알 수 있다.

다음으로 XPS 분석을 수행하였다. XPS는 성분의 조성뿐 아니라 분석원소의 화학적결합상태도 분석할 수 있고 깊이분해능도 1.5~3 nm로서 우수하나, 원소의 분석한계는 AES와 큰 차이가 없으므로 미량 원소의 분석에는 역시 한계가 있다. 본 연구에서 사용한 XPS 분석기는 ESCA 2000으로서 X-ray source는 Mg K- $\alpha$ 를 사용하였고 분석 시 pass-energy는 58.55 eV를 유지하였다.

그림 2 및 3에 ICP 식각공정을 거친 실리콘 시편표면의 XPS wide scan 스펙트럼과 Si, F, Cl, Br의 narrow scan 스펙트럼을 나타내었다. 각각의 피크는 C의 결합에너지 284.5 eV를 기준으로 보정하였다. XPS 분석을 통해 AES에서 분석되지 않았던 F 피크를 확인할 수 있었다. F 피크의 경우 Si-F 결합상태를 나타내주는 결합에너지 686.5 eV[8]에서 나타났으며, F의 조성은 측정된 F 피크 강도와 F원소의 XPS 원자측정감도지수(atomic sensitivity factor)로부터 계산한 결과 약 0.4 at %로 분석되었다. Cl과 Br의 경우 각각의 스펙트럼을

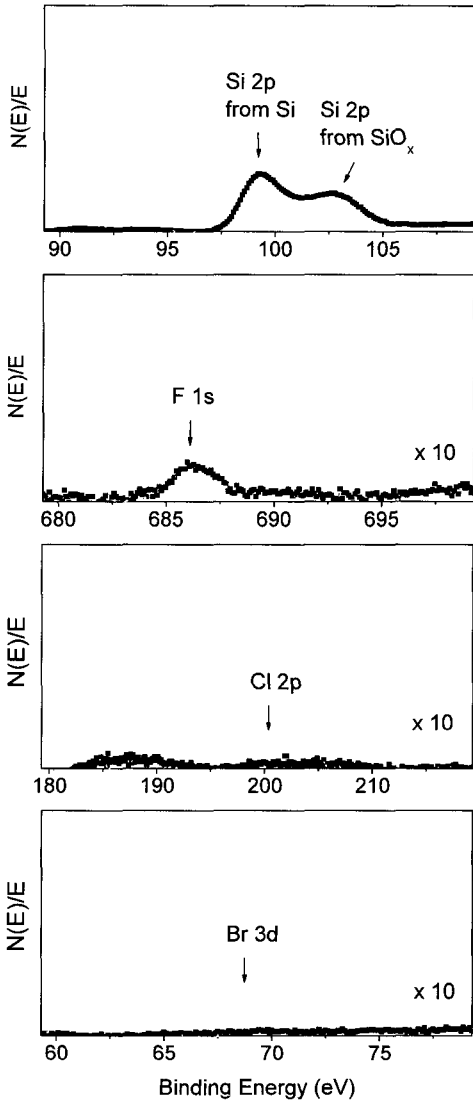


그림 3. 유도결합플라즈마 식각 후 Si 표면의 XPS 스펙트럼.  
 Fig. 3. XPS narrow spectra obtained from the ICP etched Si surface.

수 십 배 확대해 보았지만 명확하게 피크의 존재를 확인할 수 없었다. Cl 및 Br의 XPS element sensitivity factor는 F를 기준으로 각각 1.05, 0.89로서 F와 별 차이가 없으므로 Cl 및 Br은 F보다는 작은 미량으로 존재함을 알 수 있다. Si의 경우 99.7 eV와 102.6 eV에서 피크가 나타났다. Binding energy 99.7 eV는 Si-Si 결합을 나타내며 102.6 eV는 실리콘산화막에서의 실리콘 결합을 나타내는

것으로서 실리콘 표면층에 매우 얇은 실리콘산화막이 형성되어 있음을 보여주고 있다. 일반적으로 실리콘 표면에 형성되어 있는 얇은 실리콘 산화막의 두께는 XPS 스펙트럼을 통해 구할 수 있다[9].

$$\frac{I_{SiO_2}}{I_S} = \frac{I_{SiO_2}^\infty}{I_S^\infty} \frac{1 - \exp[-d_{oxide}/L_{SiO_2} \cos \theta]}{\exp[-d_{oxide}/L_{SiO_2} \cos \theta]} \quad (1)$$

여기서  $I_{SiO_2}$ 와  $I_S$ 는 시편의 XPS intensity이며  $I_{SiO_2}^\infty$ 와  $I_S^\infty$ 는 순수한 bulk 물질의 XPS intensity이다.  $L_{SiO_2}$ 는 실리콘 2p 광전자의 실리콘산화막에서의 attenuation length이고  $\theta$ 는 take-off angle이다. 식 (1)은 다음과 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$d_{oxide} = L_{SiO_2} \cos \theta \ln(1 + R_{exp}/R_o) \quad (2)$$

$R_{exp}$ 는  $I_{SiO_2}/I_S$ 의 측정비이며,  $R_o$ 는  $I_{SiO_2}^\infty/I_S^\infty$  값이다. 여기서  $R_o$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_o = \frac{N_{SiO_2} Q_{SiO_2} \lambda_{SiO_2}}{N_S Q_S \lambda_S} \quad (3)$$

$N$  값은 실리콘과 실리콘산화막에서 실리콘 원자의 밀도,  $Q$  값은 elastic scattering 효과를 나타내며  $\lambda$ 는 실리콘과 실리콘산화막에서의 광전자의 IMFP(inelastic mean free path)를 나타낸다. Seah와 Spencer[9]의 연구로부터  $L_{SiO_2} = 2.964$  nm를 얻을 수 있으며 실리콘산화막에 대한  $R_{exp}$  값은 XPS 분석 결과 1.12를 얻었으며  $R_o$  값은 Yato 등 [10]의 연구로부터 0.67을 얻을 수 있다. 본 연구에서의 take-off angle은 20°이며 이들을 통해 계산해보면 식각 된 실리콘 표면에 약 2~3 nm의 실리콘산화막이 형성되어 있음을 알 수 있다.

SIMS는 1차 이온을 시편에 입사시켜 시편 표면에서 스퍼터링 되어 나오는 2차 이온을 질량 분석기로 검출하여 질량/전하의 비율을 측정하는 분석법이다. SIMS는 AES와 XPS로는 분석이 불가능한 H를 비롯하여 모든 원소를 분석할 수 있으며 1 ppm 이하의 미량원소도 분석이 가능하다. Dynamic-SIMS의 경우 초미량원소의 측정이 용이하나 깊이분해능이 우수하지 못하므로 시편 최외각표면의 원자층을 분석하기에는 적합하지 않다.

반면 static-SIMS의 경우는 dynamic-SIMS에 비하여 초미량원소의 분석능력이 다소 떨어지나 그레도 미량원소의 분석능력이 AES나 XPS에 비해서 매우 우수하고, 시편 최외각 표면을 단원자층 단위로 분석할 수 있을 정도로 깊이분해능이 우수하므로 본 연구에서는 static-SIMS를 이용하여 시편을 분석하였다.

Static-SIMS를 이용하여 시편을 표면부터 식각하면서 깊이에 따른 불순물 원소들의 2차 이온 intensity를 측정하였다. 본 연구에서 사용한 static-SIMS 분석기는 TOF (time-of-flight) 이온분석기를 장착한 ION-TOF V이었다. 표면 분석 시 입사 이온으로는  $\text{Bi}^{1+}$ 를 사용하였으며 입사 이온빔의 가속전압은 25 kV, 전류는 1.5 pA 그리고 입사 이온 밀도는  $1.89 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 를 유지하였다. Depth profile을 얻기 위해서  $\text{Bi}^{1+}$  이온빔 전류를 증가시켜 일정 시간 표면층을 이온 스퍼터링 표면식각을 행하였다. 본 실험조건에서 이들 이온 스퍼터링 표면식각 속도는 5~10 nm/min이다. 분석시편은 10초부터 4분까지 이온 스퍼터링 표면식각을 해가면서 깊이에 따른 각 원소의 intensity를 측정하였다.

앞서 AES 및 XPS 분석으로는 식각처리 한 시편들로부터 Cl, Br, F 등의 식각불순물 원소들의 분석이 어려웠으므로, 후처리 공정 처리를 한 시편들로부터도 의미 있는 결과를 얻을 수 없었다. 하지만 static-SIMS에서는 1 ppm 정도의 미량원소 분석도 가능하므로 식각된 시편 뿐 아니라 각기 다른 3가지의 후처리공정을 수행한 시편의 표면도 분석하여 이들 후처리공정의 불순물 제거 효과를 조사하였다.

그림 4에 분석시편들의 static-SIMS depth profile을 나타내었다. Static-SIMS 분석 결과 AES 및 XPS에서는 잘 분석되지 않았던 H, F, Cl, Br 원소들이 모두 분석되었다. 그런데 플라즈마 식각처리된 시편은 약 20~25초 정도의  $\text{Bi}^{1+}$  이온 스퍼터링 표면식각 후에 그리고 후처리를 거친 시편은 약 15~20초 정도의 이온 스퍼터링 표면식각 후에 각 불순물 원소들의 2차 이온의 수가 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 실리콘산화막에서의 2차 이온 형성확율이 실리콘에서의 그것보다 보통 3~4 order 정도 크므로, 실리콘산화막 분석 시 측정되는 2차 이온의 intensity가 실리콘 분석 시에 비해 매우 크게 나타난다. 실리콘은 표면에 실리콘산화막이 형성되는데, 그림 4에서 2차 이온의 수가 크게 감소하는 지점이 실리콘 표면의 산화막 층에서 실리

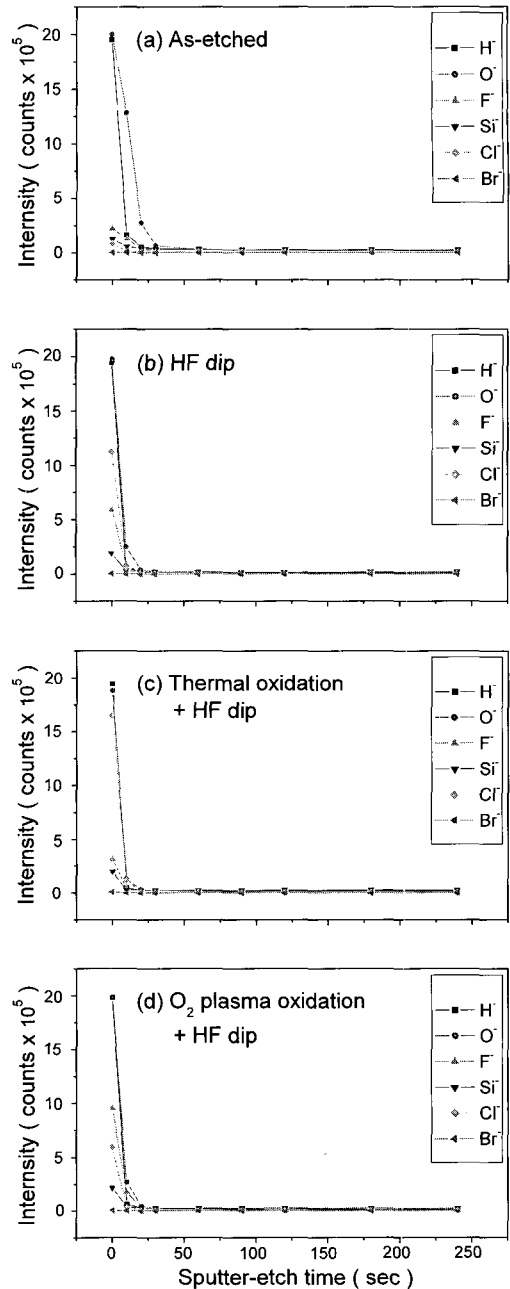


그림 4. Static-SIMS 깊이분포도 (a) 유도결합플라즈마 식각 후 Si 표면 (b-d) 후처리 공정 후의 Si 표면.

Fig. 4. Static-SIMS depth profiles obtained (a) from the ICP as-etched Si surface and (b-d) from the post-etch treated Si surfaces.

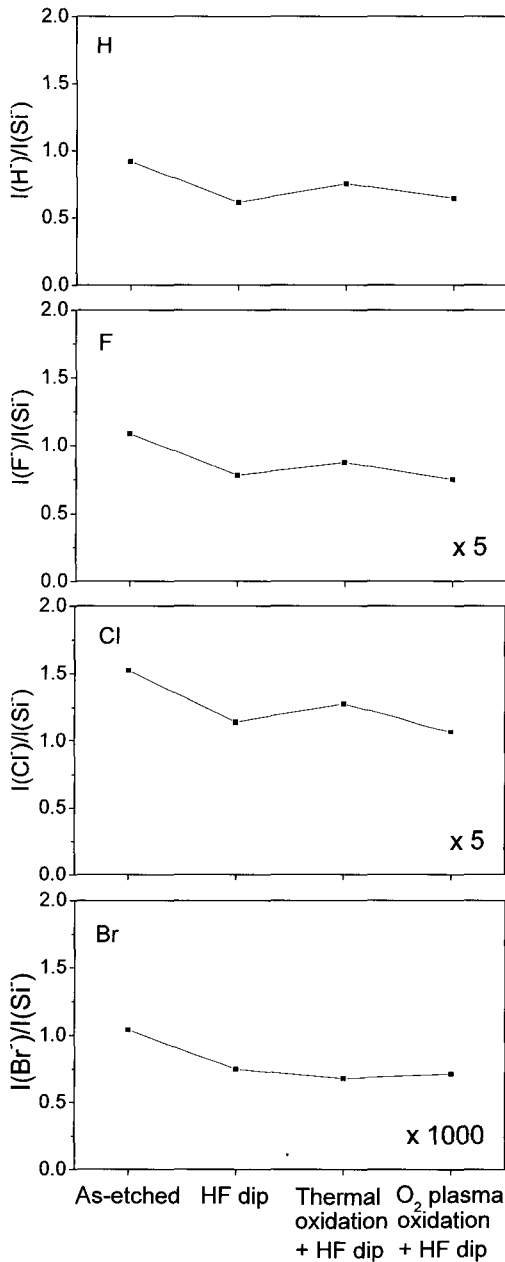


그림 5. 2분간의 이온 스퍼터링 표면식각 후 깊이 10~20 nm에서 각 불순물 이온들의 intensity를 Si<sup>-</sup> 이온의 intensity로 나눈 relative SIMS intensity

Fig. 5. Relative SIMS intensities of impurity ions with respect to Si<sup>-</sup> secondary ion intensity measured at the depth of 10~20 nm below the sample surface after 2 minutes' sputter etching.

콘 층으로 변화되는 지점이 된다. 이온 스퍼터링의 표면식각 속도로부터 계산해 보면 이 표면 실리콘 산화막의 두께는 약 2~3 nm 정도임을 알 수 있다. 또한 Br을 제외한 대부분의 불순물들이 4분 동안의 이온 스퍼터링 표면식각 후에도 검출되는 것으로 보아 약 20~40 nm의 깊이까지도 불순물의 침투가 이루어졌다는 것을 알 수 있다.

SIMS는 원소분해능이 매우 우수하여 극소량의 원소분석이 가능하나 SIMS 분석 시 측정하는 2차 이온의 발생 확률이 분석 표면의 조성 및 결정구조에 따라 매우 민감하게 변화하는 문제점이 있다. 본 연구에서의 분석 시편의 표면층은 깊이에 따른 조성 변화가 매우 심하기 때문에 SIMS 스펙트럼으로부터 각 불순물의 성분을 정량적으로 정확하게 분석하기는 불가능하다. 따라서 후처리공정의 효과를 알아보기 위하여 어느 원소의 2차 이온의 측정 intensity를 직접 비교하는 것은 의미가 없다. 본 연구에서는 일정한 시간의 이온 스퍼터링 표면식각 후 각 불순물들의 intensity를 Si<sup>-</sup> 2차 이온 intensity를 기준으로 나타낸 relative intensity를 이용하여 후처리효과를 비교하였다.

그림 5에 2분 동안의 이온 스퍼터링 표면식각 후, 즉 시편표면으로부터 약 10~20 nm 깊이에서의 각 불순물 원소의 relative intensity를 나타내었다. H, F, Cl, Br 모두 후처리 공정에 의해 표면 불순물의 양이 감소하였음을 알 수 있다. 후처리 방식에 따라 불순물 제거 효과는 큰 차이가 나지는 않았지만 산소 플라즈마에 의한 산화막 형성 후 HF 처리의 경우가 미세하나마 보다 효과적이었다고 판단된다. 열산화막 형성의 경우 높은 열처리온도로 인해 실리콘 표면의 불순물들이 실리콘 내부로 확산해 들어가 이 후에 열산화막을 제거하여도 불순물들이 상대적으로 더 많이 남아 있는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

플라즈마 식각에 의한 Si 표면의 식각불순물 원소를 표면분석기기들을 이용하여 분석하였으며, 이들 불순물을 제거하는 후처리 방법으로 HF 처리, 열산화막 형성 후 HF 처리, 산소 플라즈마에 의한 산화막 형성 후 HF 처리를 이용하였다.

AES 분석에서는 불순물 식각원소인 F, Cl, Br 원소는 AES의 분석 한계 이하로서 분석되지 못하였다. XPS 분석을 통해서도 Si-F 결합상태로 F가

약 0.4 at % 정도 표면에 존재함을 알 수 있었으나 Br, Cl 은 분석되지 못했다. Static-SIMS 분석 결과 표면에서 식각기체 원소들을 모두 분석할 수 있었다. 유도결합 플라즈마 식각 후에 실리콘 표면에 약 2~3 nm의 실리콘산화막 층이 형성되어 있었음을 알 수 있었으며 H, F, Cl 등은 표면에서 약 20~40 nm 깊이까지 침투했음을 알 수 있었다. 후처리공정에 의해 H, F, Cl, Br 식각불순물이 감소됨을 확인할 수 있었다. 불순물 제거 효과는 후처리 방식에 따라 큰 차이가 나지는 않았지만 산소 플라즈마에 의한 산화막 형성 후 HF 처리가 미세하나마 보다 효과적이라고 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 하이닉스반도체(주)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] G. Oehrlein, "Dry etching damage of silicon: a review", Mater. Sci. Eng. B, Vol. 4, No. 1-4, p. 441, 1989.
- [2] F. Moghadam and X. C. Mu, "A study of contamination and damage on Si surfaces induced by dry etching", IEEE trans. Electron. Devices, Vol. 36, No. 9, p. 1602, 1989.
- [3] H. S. Kim, W. J. Lee, W. J. Lee, G. Y. Yeom, J. H. Kim, and K. W. Whang, "Etch-induced physical damage and contamination during highly selective oxide etching using  $C_4F_8/H_2$  helicon wave plasmas", J. Electrochem. Soc., Vol. 146, No. 4, p. 1517, 1999.
- [4] O. Kwon and H. H. Sawin, "Postsilicon oxide etch cleaning process using integrated ashing and an HF vapor process", J. Electrochem. Soc., Vol. 153, No. 6, p. G515, 2006.
- [5] X. Mu, S. J. Fonash, G. S. Oehrlein, S. N. Chakravarti, C. Parks, and J. Keller, "A study of  $CClF_3/H_2$  reactive ion etching damage and contamination effects in silicon", J. Appl. Phys., Vol. 59, No. 8, p. 2958, 1986.
- [6] H. Nishino, N. Hayasaka, K. Horioka, J. Shiozawa, S. Nadahara, N. Shooda, Y. Akama, A. Sakai, and H. Okano, "Smoothing of the Si surface using  $CF_4/O_2$  down-flow etching", J. Appl. Phys., Vol. 74, No. 2, p. 1349, 1993.
- [7] S. M. Koo, S. K. Lee, C. M. Zetterling, and M. Östling, "Electrical characteristics of metal-oxide-semiconductor capacitors on plasma etch-damaged silicon carbide", Solid-State Electronics, Vol. 46, No. 9, p. 1375, 2002.
- [8] X. Cao and R. J. Hamers, "Formation of a surface-mediated donor - acceptor complex : coadsorption of trimethylamine and boron trifluoride on the silicon (001) surface", J. Phys. Chem. B, Vol. 106, No. 8, p. 1840, 2002.
- [9] M. P. Seah and S. J. Spencer, "Ultrathin  $SiO_2$  on Si II. Issues in quantification of the oxide thickness", Surf. Interface Anal., Vol. 33, No. 8, p. 640, 2002.
- [10] F. Yano, A. Hiraoka, T. Itoga, H. Kojima, K. Kanehori, and Y. Mitsui, "X-ray photoelectron spectroscopy study of submonolayer native oxides on HF-treated Si surfaces", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 13, No. 6, p. 2671, 1995.