

# HCl 가스에 의한 실리콘 基板의 에칭 (Vapor Etching of Silicon Substrates with HCl Gas)

趙庚翼\*, 尹東漢\*\*, 宋成海\*

(Kyoung Ik Cho, Dong Han Yoon and Sung Hae Song)

### 要 約

良質의 에피택셜 층을 成長시키기 위해서는, 에피택셜 층을 成長시키기 직전에 HCl 가스를 使用하여 실리콘 基板을 에칭하는 過程이 거의 언제나 포함된다. 本 論文에서는, 大氣壓 [1 氣壓]과 減壓 [0.1 氣壓]에서 HCl 가스 濃도와 에칭 溫度의 變化에 따른 에칭 速度 및 에치-피트 生成에 관하여 調査하였다. 그 結果, 大氣壓 工程과 減壓 工程 모두 에칭 速度는 HCl 가스 濃도의 2乘 [ $X_{HCl}^2$ ]에 比例하였으며, 명목상 活性化 에너지는 0~11 Kcal/mole인 것으로 나타났다. 이러한 結果로부터, 減壓 工程에서 HCl 가스에 의해 실리콘이 에칭되는 것은 大氣壓 工程에서와 같이 다음과 같은 反應에 의해 일어난다고 豫測된다;  $Si + 2 HCl \rightleftharpoons SiCl_2 + H_2$ .

### Abstract

The production of high-quality epitaxial layers almost always involves an etching step of silicon substrates with HCl gas prior to epitaxy. In this work, an investigation has been made on the etch rate and the etch-pit formation as a function of HCl gas concentration and etch temperature at atmospheric pressure (1 atm.) and reduced pressure (0.1 atm.). As a result, it is found that the etch rate is proportional to the square of the HCl gas concentration ( $X_{HCl}^2$ ) and the apparent activation energy is between 0 and +11 Kcal/mole for both atmospheric and reduced pressure operation. From these results, it is expected that the HCl etching of silicon in reduced pressure operation proceeds, as in atmospheric operation, via the reaction;  $Si + 2 HCl \rightleftharpoons SiCl_2 + H_2$ .

### I. 序 論

半導體 素子の 製造에서 실리콘 웨이퍼의 表面을 깨끗하게 유지하는 것은 매우 중요하다. 특히, 바이폴라 集積回路의 製造에서, 不純物 擴散 工程에 의해 埋入層 (buried layer)을 형성한 後, 에피택셜 층 (epitaxial

layer)을 成長하게 되는데, 이 때 에피택셜 층에 生成되는 여러 가지 缺陷 (defect)들은 그 대부분이 基板 (substrate) 웨이퍼의 表面 狀態에 따라 크게 좌우되므로, 웨이퍼의 表面을 깨끗하게 유지하는 것이 절실히 要求된다.

그리하여, 보통 에피택셜 층을 成長하기 직전에 에피택셜 리액터 (reactor) 내에서 HCl 가스에 의한 in-situ 에칭 (etching) 處理를 함으로써, 에피택셜 층內的 缺陷 密度를 最小限度로 하고 있다. 즉, 1100~1200 °C의 範圍에서 H<sub>2</sub> 속에 1~2%로 희석된 HCl 가스에 의한 에칭은 基板 웨이퍼의 表面에서의 化學的 汚染物 (chemical contaminant)은 물론 얇은 機械的 손상 (shallow mechanical damage)을 제거하는데 매우 効

\*正會員, 韓國電子技術研究所  
(Korea Institute of Electronics Technology)

\*\*正會員, 金鳥工大 電子工學科  
(Kum Oh Institute of Technology)

接受日字: 1984年 4月 25日

(※ 本 研究는 科學技術處 1982年度 國策 과제 SN 8216으로 이루어졌음.)

果의인 方法으로 알려져 있다.<sup>1)</sup>

그러나, 이러한 HCl 에칭에는 부수적으로 여러가지 問題點들이 따른다.<sup>(2,3)</sup> 이 중에서 가장 심각한 것은, HCl 가스의 濃度가 너무 높거나 에칭 溫度가 너무 낮을 경우에 選擇的 에칭(preferential etching)이 일어나므로써 웨이퍼 表面을 깨끗하게 하기는 커녕 오히려 에치-피트(etch-pit)를 生成시킨다는 것이다.<sup>(4,5)</sup>

한편, 리액터內的 壓力을 낮추어 減壓[보통 0.1 氣壓]에서 에피택셜 층을 成長시키게 되면, 大氣壓 工程에 비해 패턴 이동(pattern shift)이 줄어들고, 오토도핑(autodoping)이 줄어드는 등 에피택셜 층의 質을 改善하는데 여러가지 長點들을 갖는 것으로 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 그리하여, 最近에는 減壓에서 에피택셜 층을 成長시키는 것이 일반적인 추세이며, 따라서 HCl 에칭 또한 減壓에서 이루어질 必要가 있다.

그러나, 지금까지 報告된 HCl 에칭에 관한 論文들은 모두 大氣壓에서 행한 것이고 減壓에서의 것은 報告된 바 없으며, 에칭 速度에 대한 데이터 또한 研究者들마다 상당한 차이가 있다.<sup>(4,5,7,10)</sup>

따라서, 本 論文에서는 大氣壓[1 氣壓]에서는 물론 減壓[0.1 氣壓]에서, HCl 가스에 의한 실리콘의 에칭 速度 및 에치-피트 生成 與否를 觀察함으로써, HCl 에칭시의 여러 現象들을 大氣壓 工程과 減壓 工程에 대해 比較 檢討하였다.

## II. 實驗 方法

모든 實驗은, 溫度 및 가스의 流量, 그리고 리액터內的 壓力을 自動的으로 制御할 수 있는, 輻射熱 加熱(radiant heating) 방식의 圓筒形(cylindrical) 에피택셜 리액터[AMC-7800RPX]에서 행하였다. 그리고, 웨이퍼가 놓이는 서셉터(susceptor)는 SiC로 塗布된 흑연(graphite)서셉터로서, 에칭 實驗을 행하기 以前에 1080°C에서  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  가스를 利用하여 서셉터 表面을 실리콘으로 완전히 塗布하여 使用하였다. 그 이유는, 에피택셜 층을 成長시킬 때 缺陷 密度를 줄이기 위하여 보통 서셉터를 실리콘으로 塗布하여 使用하기 때문이다.

使用된 基板 웨이퍼는 結晶 配向(crystal orientation)이 (110)方向으로 3~5°偏向(off)된 (111) 실리콘 웨이퍼로서, 比抵抗 값이  $0.008 \sim 0.020 \Omega \cdot \text{cm}$  (Sb-doped)인 것이다. 이러한 n-基板위에  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  가스를 使用하여 比抵抗 값이  $1.0 \Omega \cdot \text{cm}$  인 에피택셜 층을 成長시켰다. 運搬(carrier) 가스 및 에칭 가스로는 각각 高純度의  $\text{H}_2$  [ $< 1 \text{ppm O}_2$ ]와 HCl 가스[Matheson社, 純度: 99.99%]를 使用하였다.

에칭 實驗은 리액터內的 全體 壓力이 1 氣壓일 경우[大氣壓 工程]와 0.1 氣壓일 경우[減壓 工程]로 나누어 행하였는데, 이때 에칭 溫度는 920°C에서 1140°C까지 變化시켰으며,  $\text{H}_2$ 의 流量은 230ℓ/min으로 一定하게 하고 HCl 가스의 流量을 變化시켰으므로써, HCl 가스의 濃度[HCl/ $\text{H}_2$ ]가 0.76~3.3%가 되도록 하였다.

에칭된 실리콘의 두께는, 赤外線 干涉을 利用한 film thickness gauge[Digilab社]를 使用하여 에칭 前後의 에피택셜 층의 두께를 測定함으로써, 그 두께의 차이로부터 구하였다. 그리고, 에칭 速度는 에칭된 실리콘의 두께를 에칭 時間으로 나누어 구하였는데, 그것은 에칭 時間을 變化시켰을 때 에칭된 실리콘의 두께는 어떠한 潛伏期(incubation time)도 없이 에칭 時間에 線型的으로 比例하였기 때문이다(그림1 참조).

에치-피트의 生成 與否는 어떠한 化學的 에칭도 하지 않은 상태에서 光學 顯微鏡을 使用하여 觀察하였다.

## III. 結果 및 考察

그림 1은 大氣壓 工程[1 氣壓]과 減壓 工程[0.1 氣壓]에 대해, HCl 가스에 의해 에칭된 실리콘의 두께를 에칭 時間의 函數로 나타낸 것이다. 이때의 에칭 溫度는 1140°C이며, HCl 가스의 濃度は 1.9%이었다.

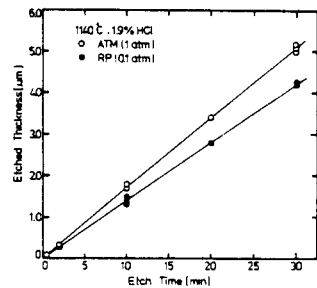


그림 1. 에칭 時間에 따른 에칭된 실리콘의 두께 變化  
Fig. 1. Etched thickness of silicon as a function of the etch time (1140°C, 1.9% HCl).

여기에서 보면, 에칭된 실리콘의 두께는 에칭 時間에 線型的으로 比例한다. 뿐만 아니라, 데이터 點들을 연결한 直線이 완전히 原點[에칭 時間이 0분이고 에칭된 두께가 0μm인 지점]을 지나는 것으로 보아 HCl 가스에 의해 실리콘이 에칭될 때에는 潛伏期(incubation time)가 없음을 알 수 있다. 따라서, 에칭 速度는 에칭된 실리콘의 두께를 에칭 時間으로 나누었을 때의 값이 된다.

그림 2는 에칭 溫度가 1140°C일 때, HCl 가스의 濃度[H<sub>2</sub>에 대한 HCl 가스의 몰(mole) 비; HCl/H<sub>2</sub>]에 따

른 에칭 速度의 變化를 나타낸 것으로, 大氣壓 工程과 減壓 工程을 比較한 것이다. HCl 가스의 濃度 範圍는 0.76~3.3%이었다.

이 그림에서, 실리콘의 에칭 速度는 리액터의 全體 壓力에 관계없이 HCl 가스의 濃度가 增加함에 따라 直線의 으로 增加하며, 直線의 기울기는 約 2.0이다. 또한, 실리콘의 에칭 速度는 大氣壓 工程의 경우가 減壓 工程에 비해 다소 크다. 즉, HCl 가스의 濃度가 一定 할 때 減壓 工程에서의 에칭 速度는 大氣壓 工程에서의 에칭 速度 값의 約 82%인 것으로 나타났다.

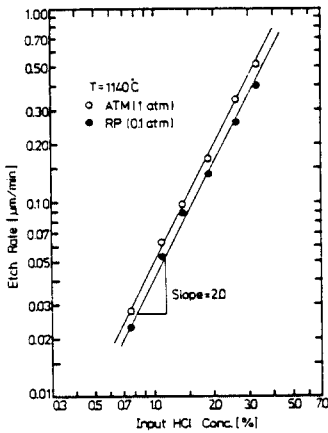


그림 2. HCl 가스의 濃度에 따른 실리콘 에칭 速度의 變化

Fig. 2. Etch rate of silicon as a function of the HCl gas concentration at 1140°C.

그림으로부터, 실리콘의 에칭 速度,  $R_E$  ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )에 대하여 다음과 같은 식들이 얻어진다.

大氣壓 工程의 경우;

$$R_E = 4.9 \times 10^2 \cdot (X_{\text{HCl}})^2 \quad (1)$$

減壓 工程의 경우;

$$R_E = 4.0 \times 10^2 \cdot (X_{\text{HCl}})^2 \quad (2)$$

여기에서,  $X_{\text{HCl}}$ 은 HCl 가스의 濃度(물 비)이다. 이 식으로부터, 실리콘의 에칭 速度는 HCl 가스 濃度の 2 乘에 比例함을 알 수 있다. 이와 같은 結果는 Bloem,<sup>7,8)</sup> Putte 등<sup>15)</sup>의 報告와 一致하는 것으로, 大氣壓 工程에서 실리콘의 에칭 速度는 HCl 가스의 濃도가 10% 以下인 範圍에서 HCl 가스 濃度の 2 乘에 比例하는 것으로 報告되어 있다.

한편, 熱力學 데이터에 의하면,<sup>15)</sup> Si-H-Cl 시스템에서 중요한 氣相 化合物(gas phase compound)에는 HCl과  $\text{H}_2$ 외에  $\text{SiCl}_2$ ,  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{SiHCl}_3$  등이 있지만, 1300°K ~ 1600°K에서 실리콘을 포함하는 가장 지배적인(dominant) 氣相 化合物는  $\text{SiCl}_2$ 이며, 大氣壓 工程에서 실

리콘이 HCl 가스에 의해 에칭되는 것은 다음과 같은 全體 反應(overall reaction)에 의해 일어난다고<sup>15,8,9)</sup> 알려져 있다.



그림 2에서, 실리콘의 에칭 速度는 大氣壓 工程과 減壓 工程이 같은 傾向을 나타내고 있다. 따라서, 減壓 工程에서 실리콘이 HCl 가스에 의해 에칭되는 것도 大氣壓 工程에서와 같이 식 (3)의 全體 反應에 의해 일어난다고 豫測된다.

리액터 내에서 熱力學 平衡이 이루어졌을 때, 실리콘의 에칭 速度,  $R_E$ 는 에칭 反應에 의해 生成된  $\text{SiCl}_2$ 의 濃度 [ $X_{\text{SiCl}_2}$ ]에 比例하므로,<sup>15,9)</sup> 식 (3)으로부터 다음과 같은 식이 얻어진다.

즉,

$$R_E \propto X_{\text{SiCl}_2} = K \frac{(X_{\text{HCl}})^2}{X_{\text{H}_2}} \quad (4)$$

여기에서, K는 平衡 常數이며,  $X_{\text{HCl}}$ ,  $X_{\text{H}_2}$ 는 각각 HCl,  $\text{H}_2$ 의 물 비이다. 本 論文에서와 같이  $\text{H}_2$ 를 運搬 가스로 使用하는 시스템에서는 HCl 가스의 量은  $\text{H}_2$ 에 비해 매우 작으므로  $X_{\text{H}_2} \approx 1$ 이다. 따라서, 에칭 速度,  $R_E$ 는  $(X_{\text{HCl}})^2$ 에 比例하게 된다.

그리고, 식 (1)과 (2)에서  $(X_{\text{HCl}})^2$  앞의 比例 常數(즉,  $4.9 \times 10^2$ ,  $4.0 \times 10^2$ )는 平衡 常數 뿐만 아니라 停滯層(boundary layer 또는 stagnant layer)의 두께 및  $\text{SiCl}_2$ 의 擴散 係數, 그리고 리액터 内の 壓力 및 工程 溫度 등에 의해 결정되는 常數로서,<sup>15)</sup> 大氣壓 工程과 減壓 工程에서 常數의 값이 다른 것은 리액터 内の 壓力의 差別에 의해 이러한 因子들이 달라지기 때문으로 생각된다.

그림 3은 에칭 溫度에 따른 에칭 速度의 變化를 나타낸 것으로, HCl 가스의 濃도가 大氣壓 工程에서 1.9%이고, 減壓 工程에서 1.9%, 2.6%, 3.3%일 경우이다.

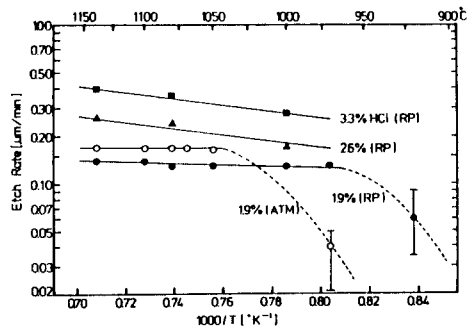


그림 3. 실리콘 에칭 速度의 溫度 依存性

Fig. 3. Temperature dependence of the etch rate of silicon.

그림으로부터, 에칭 速度를 에칭 溫度의 函數로서 Arrhenius 式으로 나타내었을 때, 大氣壓 工程의 경우 명목상 活性化 에너지(apparent activation energy) 값은 0 Kcal/mole이며, 減壓 工程의 경우에는 HCl 가스의 濃도가 1.9%, 2.6%, 3.3%일 때 명목상 活性化 에너지 값은 각각 1.6, 11.1, 9.1 Kcal/mole로서 HCl 가스 濃도에 따라 별다른 傾向을 보이지 않았다.

한편, Kuyer 등의 報告에 의하면,<sup>19)</sup> 大氣壓 工程에서 HCl 가스의 濃도가 1%~10%인 範圍에서 活性化 에너지 값은 HCl 가스 濃도에 따라 별다른 傾向을 보이지 않고 0~12 Kcal/mole이었다.

이로부터, 活性化 에너지 값은 減壓 工程[本論文의 結果; 1.6~11.1Kcal/mole]에서와 大氣壓 工程[本論文의 結果; 0Kcal/mole, Kuyer 등의 結果; 0~12Kcal/mole]에서 서로 一致하며, HCl 가스 濃도에 따라 달라지지 않음을 알 수 있다.

그림 3에서, 低溫 부근에서 에칭 速度의 變化가 큰 것은 大氣壓 工程의 경우 970℃에서, 減壓 工程의 경우 920℃에서 심하게 選擇의 에칭이 일어남으로써 웨이퍼 表面에 크고 작은 에치-피트가 무수히 生成되었기 때문이다(그림 4 참조). 事實, 選擇의 에칭이 일어났을 때에도 重量 利得(weight gain) 方法[에칭 前後의 무게 差異로부터 에칭 速度를 구하는 方法]으로 測定을 하게 되면, 選擇의 에칭이 일어나지 않은 경우[高溫部分]에서와 같이 精確한 에칭 速度를 얻을 수가 있다.<sup>19)</sup> 그러나, 本論文에서와 같이 film thickness gauge를 使用한 方法에서는 오로지 選擇의 에칭이 일어나지 않은 部分만을 測定하기 때문에, 심하게 選擇의 에칭이 일어날 경우에는 精確한 에칭 速度를 얻을 수 없게 된다.<sup>19)</sup> 이러한 에치-피트의 生成은 에칭 溫度가 낮을수록, 그리고 HCl 가스의 濃도가 클수록 쉽게 生成된다고 알려져 있다.<sup>14,5)</sup>

그림 4는 HCl 에칭을 한 後에 어떠한 化學的 에칭도 하지 않은 상태에서 웨이퍼 表面을 觀察한 光學顯微鏡 사진으로서, 몇 가지 溫度에 대해 大氣壓 工程[왼쪽 사진]과 減壓 工程[오른쪽 사진]을 比較한 것이다.

大氣壓 工程의 경우, 에칭 溫度가 1140℃[그림4(a)]에서 1080℃일 때까지는 웨이퍼 表面에서 어떠한 에치-피트도 觀察되지 않았으나, 1070℃[그림4(b)]와 1050℃에서는 매우 희미한 줄무늬(striation) 모양의 에치-피트가 觀察되었으며, 970℃[그림4(c)]에서는 크고 작은 에치-피트가 무수히 生成되어 있었다. 그리고, 920℃[그림4(d)]에서는 오히려 큰 에치-피트는 없어지고 아주 작은 에치-피트만 生成되어 있었다. 이것은, 920℃에서는 에칭 溫度가 너무 낮아 에칭이 거의

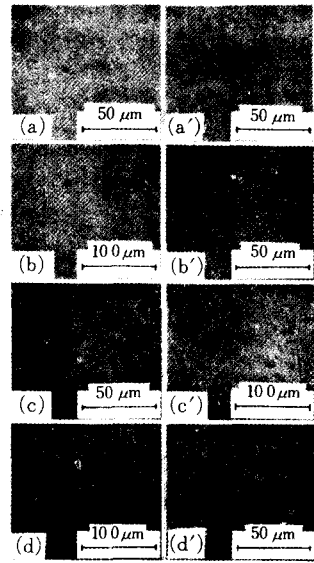


그림 4. 大氣壓[左]과 減壓[右]에서 에칭 溫度에 따른 실리콘 基板의 表面 構造의 變化 (a), (a') 1140℃ (b), (b') 1070℃ (c), (c') 970℃ (d), (d') 920℃

Fig. 4. Surface structure of silicon substrate at the HCl concentration of 1.9% as a function of the etch temperature at atmospheric[left] and reduced pressure[right]. (a), (a') 1140℃ (b), (b') 1070℃ (c), (c') 970℃ (d), (d') 920℃

이루어지지 않았기 때문으로 생각된다. 事實, 920℃에서 에칭 速度는 거의 0 μm/min이었다.

減壓 工程의 경우에는 大氣壓 工程과는 달리, 1140℃[그림4(a')]에서는 물론 1070℃[그림4(b')]와 1050℃에서도 웨이퍼 表面에서 에치-피트를 觀察할 수 없었으며, 1000℃와 970℃[그림4(c')]에서는 大氣壓 工程에서의 1070℃[그림4(b)]에서와 같이 웨이퍼 表面에 매우 희미한 줄무늬 모양의 에치-피트가 生成되어 있었고, 920℃[그림4(d')]에서는 大氣壓 工程에서의 970℃[그림4(c)]에서와 같이 크고 작은 에치-피트가 무수히 生成되어 있었다. 이로써, 減壓 工程의 경우에는 大氣壓 工程에 비해 에치-피트가 生成되기 시작하는 溫度가 50~70℃ 가량 낮아진 것을 알 수 있다.

Putte 등은<sup>1)</sup> 最近에 結晶 成長의 理論에서와 같이 실리콘이 HCl 가스에 의해 에칭되는 것도 웨이퍼 表面에서의 "스텝(step) 移動"에 의해 일어난다고 假定하여 실리콘의 에칭 現象에 대한 모델을 提示하였다. 이 理論에 의하면, 에치-피트가 生成되지 않은 條件에서의 에칭은 오로지 "스텝"에서만 일어난다. 따라서, 실리콘이 에칭되는 것은 스텝의 移動[lateral etching]

으로 說明된다. 그러나, 웨이퍼 表面에서  $\text{SiCl}_2$ 의 擴散 速度가 느려서, 스텝들사이에서 吸着(adsorption)된  $\text{SiCl}_2$ 의 濃도가 스텝에서의  $\text{SiCl}_2$  濃도보다 낮아지게[低飽和(undersaturation)] 되면, 스텝이 아닌 格子點(lattice site)에서 垂直(vertical) 에칭이 일어남으로써 格子空(lattice vacancy)들이 生成되는데, 이것이 바로 에치-피트의 형태로 觀察된다. 따라서,  $\text{SiCl}_2$ 의 擴散 速度가 느려서 低飽和 정도가 커질수록 에치-피트의 生成이 촉진된다. 만일, 에치-피트의 生成이 이 모델에서와 같이 일어난다면, 減壓 工程에서 에치-피트가 生成되기 시작하는 溫度가 大氣壓 工程에 비해  $50\sim 70^\circ\text{C}$  가량 낮아진 것은 다음과 같이 說明될 수 있다. 리액터内の 全體 壓力가 낮아질수록 리액터內에서 가스의 速度뿐만 아니라 擴散 速度가 크게 增加하므로,<sup>6)</sup> 減壓 工程의 경우 大氣壓 工程에 비해 웨이퍼 表面에 吸着된  $\text{SiCl}_2$ 의 擴散 速度가 훨씬 增加함으로써, 다른 모든 條件이 같아 하더라도 減壓 工程에서의 低飽和 정도는 大氣壓 工程에 비해 작아지게 되며, 따라서 에치-피트 生成이 抑制된다.

#### IV. 結 論

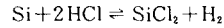
리액터內의 壓力가 1氣壓일 경우[大氣壓 工程]와 0.1氣壓일 경우[減壓 工程]에 대하여, HCl 가스에 의한 실리콘의 에칭 現象을 比較 分析하였다.

그 結果, HCl 가스에 의한 실리콘의 에칭은 어떠한 潛伏期를 必要로 하지 않았으며, 에칭 速度는 減壓 工程에서의 값이 大氣壓 工程에서의 값의 82% 정도로서 減壓 工程에서 다소 減少하긴 하였지만, 두 경우 모두 HCl 가스 濃도의 2乘에 比例하였다. 또한, 에칭 速度를 Arrhenius 式으로 나타내었을 때, 高溫 부근(大氣壓 工程;  $1050^\circ\text{C}\sim 1140^\circ\text{C}$ , 減壓 工程;  $1000^\circ\text{C}\sim 1140^\circ\text{C}$ )에서 明確상 活性化 에너지 값은 工程 壓力이나 HCl 가스 濃도에 관계 없이  $0\sim 11$  Kcal/mole로서, 에칭 速度 依存性은 매우 낮은 것으로 나타났다.

한편, 에치-피트는 大氣壓 工程에서는  $1070^\circ\text{C}$  以下에서 生成되기 시작한 반면 減壓 工程에서는  $1000^\circ\text{C}$  以下에서 生成되기 시작하였다. 이렇게, 大氣壓 工程에 비해 減壓 工程에서 에치-피트 生成 溫度가 낮아진 것은, 減壓 工程의 경우 웨이퍼 表面에 吸着된  $\text{SiCl}_2$ 의 擴散 速度가 大氣壓에서보다 훨씬 빠르기 때문에 기인한 것으로 보인다.

結論的으로, 大氣壓 工程과 減壓 工程을 比較했을 때, 에칭 速度 값 및 에치-피트 生成 溫度에 있어서 差異가 있긴 하지만, 에칭 速度의 溫度 依存性 및 HCl 가스 濃도에 대한 依存性이 비슷한 것으로 보아, 減壓 工程에서 HCl 가스에 의해 실리콘이 에칭되는 것은 大

氣壓 工程에서와 같이 다음과 같은 全體 反應에 의해 일어난다고 豫測된다;



또한, 실제 응용면에서 본다면, 半導體 製造 工程에서 工程 溫度를 낮추려는 現在의 추세로 볼 때, 에치-피트를 生成시키지 않고 에칭 溫度를 낮출 수 있다는 점에서, 에피택셜 층의 成長에서와 같이 HCl 에칭도 減壓 工程으로 하는 것이 有利하리라고 판단된다.

#### 參 考 文 獻

- [1] P.R. Choudhury, "Substrate surface preparation and its effect on epitaxial silicon," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 118, no. 7, pp. 1183-1189, July 1971.
- [2] T.L. Chu and R.L. Tallman, "Water vapor as an etchant for silicon," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 111, no. 11, pp. 1306-1307, Nov. 1964.
- [3] T.L. Chu, G.A. Gruber and R. Sticker, "In situ etching of silicon substrates prior to epitaxial growth," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 118, no. 2, pp. 156-158, Feb. 1966.
- [4] G.A. Lang and T. Stavish, "Chemical polishing of silicon with anhydrous hydrogen chloride," *RCA Rev.*, vol. 24, no. 12, pp. 488-498, Dec. 1963.
- [5] P. van der Putte, L.J. Giling and J. Bloem, "Surface morphology of HCl etched silicon wafers," *J. Crystal Growth*, vol. 41, pp. 133-145, 1977.
- [6] R.B. Herring, "Advances in reduced pressure silicon epitaxy," *Solid State Technol.*, vol. 22, no. 11, pp. 75-80, Nov. 1979.
- [7] J. Bloem, "High chemical vapor deposition rates of epitaxial silicon layers," *J. Crystal Growth*, vol. 18, pp. 70-76, 1973.
- [8] J. Bloem, "Silicon epitaxy from mixtures of  $\text{SiH}_4$  and HCl," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 117, no. 11, pp. 1397-1401, Nov. 1970.
- [9] Th. J.M. Kuyser, L.J. Giling and J. Bloem, "Gas phase etching of silicon with HCl," *J. Crystal Growth*, vol. 22, pp. 29-33, 1974.
- [10] J. Bloem and W.A.P. Claassen, "Rate-determining reactions and surface species in CVD of silicon," *J. Crystal Growth*, vol. 49, pp. 435-444, 1980. \*