

# Zeta電位에 의한 Silicon半導體 界面의 電氣二重層 解析

## (An Analysis on Electrical Double Layers at the Silicon Semiconductor Interfaces Using the Zeta Potential)

千 長 鎬\*

(Jang Ho Chun)

### 要 約

실리콘半導體와 電解質 接觸 界面의 電氣物理的 現象을 電氣二重層의 제타電位와 極小電氣泳動을 利用 하여 定性的 解析을 하였다. 懸濁液은 p형 또는 n형 실리콘粒子를 KCl溶液 또는 pH緩衝溶液內에 浮遊 시켜 準備하였다. 試料로 使用된 p형 및 n형 실리콘半導體粒子의 近似直徑은 1.5 $\mu$ m이었다. 測定된 p형 및 n형 실리콘半導體의 제타電位極性은 KCl 및 pH완충용액 모두 正이었다. KCl용액內의 p형 및 n형 실리콘의 電氣泳動 移動度 範圍는 各各 5.5-8.9 $\times 10^{-4}$ cm<sup>2</sup>/V-sec와 4.2-7.9 $\times 10^{-4}$ cm<sup>2</sup>/V-sec이었다. 相應 하는 제타電位는 70.4-114.0mV와 53.9-101.2mV이었다. 反面에 pH완충용액內의 p형 및 n형 실리콘의 電氣泳動 移動度 範圍는 各各 1.1 $\times 10^{-4}$ -2.2 $\times 10^{-3}$ cm<sup>2</sup>/V-sec와 0-2.1 $\times 10^{-3}$ cm<sup>2</sup>/V-sec이며 제타電位는 各各 14.1-281.6mV 및 0-268.8mV이다. 도핑된 실리콘半導體의 제타電位와 電氣二重層의 構造는 電解質內의 陽이온에 依하여 決定的인 影響을 받았다. KCl溶液內의 最大제타 電位는 10<sup>-2</sup>M 부근에서 測定되었으며 n형 실리콘의 等電點은 pH7 부근에서 觀測되었다. 도핑된 실리콘半導體의 空間電荷效果는 表面電荷效果에 比하여 매우 적었다.

### Abstract

Electrophysical phenomena at the silicon semiconductor-electrolyte solution interfaces were analyzed based on the zeta potential of the electrical double layer and microelectrophoresis. The suspensions were composed of the p or n-type silicon particles suspended in the KCl or pH buffer solutions. The approximate diameter of the prepared and sampled silicon semiconductor particles was 1.5  $\mu$ m. The sign of the zeta potentials of the p and n-type silicon particles in the KCl and pH buffer solutions was positive. A range of electrophoretic mobilities of the p and n-type silicons in the KCl solutions was 5.5 - 8.9 $\times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/V-sec and 4.2 - 7.9 $\times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/V-sec, respectively. The range of zeta Potentials corresponding to the electrophoretic mobilities is 70.4 - 114.0 mV and 53.9-101.2 mV, respectively. On the other hand, a range of electrophoretic mobilities of the p and n-type silicons in the pH buffer solutions was 1.1  $\times 10^{-4}$  - 2.2 $\times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/V-sec and 0 - 2.1 $\times 10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/V-sec, respectively. The range of zeta potentials corresponding to the electrophoretic mobilities is 14.1 - 281.6 mV and 0-268.8 mV, respectively. The zeta potentials and electrical double layers of the doped silicon semiconductors are decisively influenced by the positively charged ions in the solutions. The maximum values of the zeta potentials in the KCl solutions appeared at a concentration of about 10<sup>-2</sup> M.

The isoelectric point of the n-type silicon semiconductors appeared at about a pH 7. The effect of the space charge of the doped silicon semiconductors can be neglected compare with the effect of the surface charge.

\*正會員, 光云大 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Kwangwoon Univ.)

接受日字: 1986年 8月 12日

(※本 研究는 韓國科學財團의 1985年度 後半期 研究 支援에 依하여 이루어졌음.)

I. 序 論

벌크(bulk)半導體와 電解質 接觸 界面의 電氣物理的 現象에 關한 最初의 研究가 transistor를 共同 開發한 業績으로 Nobel賞을 受賞한 美國 Bell研究所의 Brattain과 그의 同僚 Garretti<sup>1)</sup>에 依하여 이루어진 以後, 많은 半導體 物理化學者들이<sup>2)</sup> 指摘한 바와 같이 半導體 材料는 金屬 材料에 比하여 特異한 電氣物理的 特性으로 因하여 半導體 電氣化學이라는 새로운 學問分野의 出現을 보게 되었으며 그 內容은 半導體 電氣物理, 表面 및 接觸界面의 電氣物理的 現象이 그 主流를 이루어 왔다. 특히 半導體와 電解質 接觸 界面에서도 導된 半導體의 接合에서 나타나는 p-n接合 效果가<sup>3)</sup> 있으며 光에너지를 化學的 에너지로 變換시킬 수 있음이 Fujishima와 Honda<sup>4)</sup>에 依하여 提示된 이후 半導體 電解質 界面現象은 電子工學, 物理化學, 電氣化學, 材料 및 콜로이드科學 등등 隣接關聯 學問間的 研究 交流 增進에 크게 기여 해왔다. 그러나 벌크半導體 와는 달리 導된 半導體粒子和 電解質 接觸界面의 電氣現象은 關聯 國外 專門 學術인 Journal of colloid and interface science에도 거의 報고되지 않았다.<sup>5-9)</sup> 半導體와 電解質이 갖고 있는 多樣하고도 特異한 物理 및 化學的 特性을 고려할 때 半導體粒子和 電解質 界面의 電氣物理的 現象은 研究와 關心을 기울여 볼 만한 半導體物性 分析 및 應用 分野라고 思慮된다.

p-n接合內의 空間電荷層과 空間電荷 效果가 半導體 素子の 基本 動作原理가 되었듯이 半導體粒子和 電解質 接觸 界面의 空間電荷層, 表面準位(surface states 또는 levels), 電氣二重層 等에 關한 研究는 半導體界面 研究의 出發點이 된다. 그러나 粒子의 크기가 마이크로미터單位이며 粒子 周圍에 形成되는 電氣二重層의 두께도 그에 相應하므로 실제 測定과 解析에는 어려움과 限界가 있다.<sup>10,11)</sup> 따라서 本 論文에서는 物理化學, 表面物理化學, 콜로이드 및 材料科學, 生體物理學 등에서 重要하게 應用되는 極小電氣泳動(microelectrophoresis)方法으로 제타電位를 決定하여 導된 シリコン半導體와 電解質의 界面現象과 電氣二重層을 定性的으로 解析하였다. 實驗結果와 定性的 解析은 관련 인접학문, 특히 半導體 콜로이드 科學과 電氣二重層 構造를 갖는 太陽에너지 變換素子,<sup>12)</sup> 半導體콜로이드 光合成,<sup>13)</sup> 電氣泳動 表示素子,<sup>14)</sup> 分子電子素子,<sup>15)</sup> 등의 基礎研究資料 提供 및 開發應用에 도움이 되리라 期待한다.

II. 半導體粒子和 電解質 接觸 界面의 電氣物理的 現象

1. 空間電荷層과 電氣二重層

半導體內의 自由電荷와 電解質內의 帶電된 이온같이 移動 可能한 電荷가 接觸 界面을 中心으로 서로 다른 相(phase), 即 固相과 液相內에 위치하면 半導體와 電解質의 電氣化學的 位置에너지 差에 依한 電荷移動이 接觸界面을 通過하여 平衡狀態에 到達 할때까지 進行된다. 따라서 接觸界面을 中心으로 半導體內에는 空間電荷層이, 電解質內에는 이온의 吸着과 吸引 分布에 따라 密集(compact; Helmholtz)二重層과 擴散(diffuse; Gouy)二重層으로 불리우는 電氣二重層이 形成된다. 그림 1의 (a)는 p形 半導體와 電解質 接觸 界面의 酸化膜을 考慮치 않았을 때 形成되는 空間電荷層과 電氣二重層 構造를 概略的으로 보여준다. 그림에서  $E_c$ 는 傳導帶內의 最底에너지準位,  $E_f$ 는 Fermi準位,  $E_v$ 는 價電帶內의 最高에너지 準位를 各各 表示한다. 그림 1의 (b)는 電解質內의 浮遊하는 球形 半導體 粒子 周圍에 形成된 空間電荷層, 表面準位, 電氣二重層의 위치를 보여준다.

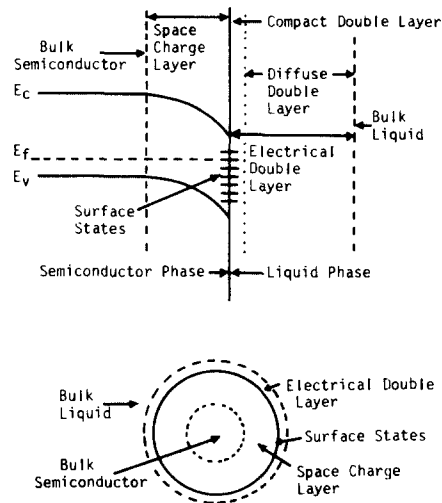


그림 1. p形 半導體와 電解質 界面의 空間電荷層과 電氣二重層

Fig. 1. A space charge layer and an electrical double layer at the p-type semiconductor-electrolyte solution interface.

平衡狀態下에서 空間電荷層內의 空間電荷 分布는 擴散二重層內의 이온 分布와 매우 類似하며 常溫에서 Boltzmann 分布를 따른다. 界面의 同量異種 電荷는 다음과 같은 平衡關係를 갖는다.

$$Q_{sc} + Q_{ss} + Q_{el} = 0 \tag{1}$$

$$Q_{ss} \equiv Q_{ss1} + Q_{ss2} \quad (2)$$

여기서  $Q_{sc}$ 는 空間電荷層內의 空間電荷量,  $Q_{ss}$ 는 表面準位內의 表面電荷量,  $Q_{ei}$ 는 電氣二重層內의 帶電된 이온電荷量,  $Q_{ss1}$ 는 半導體 表面의 格子原子 非周期性과 缺陷에 起因한 眞性表面準位 (intrinsic surface states or levels)內의 電荷量,  $Q_{ss2}$ 는 半導體 表面에 吸着된 外的이온에 起因한 吸着이온表面準位 (adsorbed surface states or levels)內의 電荷量을 各各 나타낸다.

## 2. Zeta電位

一般的으로 密集二重層의 두께는 靜電氣的 또는 化學的으로 固體 表面에 吸着 또는 吸引된 이온의 直徑으로 表示되며 그 크기는 數Å으로서 半導體 表面의 吸着이온 表面準位에 影響을 미친다.

反면에 擴散二重層의 두께는 電解質의 濃度, 이온價, 絕對溫度, 誘電常數 등의 函數로 表示되는 Debye 길이로 나타낼 수 있으며 數10Å 또는 數1000Å의 크기를 갖는다. 擴散二重層內의 이온電荷에 依한 電位分布는 Poisson-Boltzmann 方程式으로 決定할 수 있으며 電解質內에 浮遊하는 半導體 粒子 周圍에 형성된 擴散二重層內의 電位差는 測定 및 解析에 限界性이<sup>16,17)</sup> 있으나 極小電氣泳動 方法에 依하여 決定 및 解析할 수 있으며 이때의 電位를 제타(Zeta;  $\zeta$ )電位라고 부른다. 따라서 極小電氣泳動 方法은 半導體와 電解質 界面間의 空間電荷 및 表面電荷의 效果, 吸着 및 吸引된 이온의 種類, 電荷量, 表面準位 狀態등을 解析할 수 있는 有用한 測定方法이 될 수 있다. 電解質內에 浮遊된 半導體 粒子는 電解槽에 인가된 外部電界에 依하여 帶電된 狀態에 따라 漂移移動을 시작하여 電氣力과 粘性力이 均衡을 이룸에 定常狀態가 되며 이로부터 界面現象 解析에 關한 重要한 파라미터인 제타電位를 決定할 수 있다. 이러한 電氣力動學的 過程에 關한 詳細한 解析은 여러 文獻에서<sup>16,17)</sup> 찾아 볼 수 있으며 Helmholtz-Smoluchowski方程式에<sup>16,17)</sup> 依하면 粒子 모양에 相關없이 제타電位는 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta = \frac{\eta\mu}{\epsilon} \quad (\text{단 } kr > 100) \quad (3)$$

$$\zeta = \frac{2\eta\mu}{3\epsilon} \quad (\text{단 } kr < 100) \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\nu\sigma}{J} \quad (5)$$

$$k = \left( \frac{\epsilon kT}{2nZ^2q^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

여기서  $\zeta$ 는 粒子가 電解質內에서 漂移移動時 剪斷面에서의 電位, 即 제타電位,  $\eta$ 는 液體의 粘性度,  $\mu$ 는 電氣泳動移動度,  $\epsilon$ 는 液體의 誘電常數,  $\nu$ 는 漂移速度,  $\sigma$ 는 比導度,  $J$ 는 電流密度,  $k$ 는 Debye 길이의 逆數,  $r$ 은 粒

子の 半徑,  $k$ 는 Boltzmann常數,  $T$ 는 絕對溫度,  $n$ 은 電解質 濃度,  $Z$ 는 이온價,  $q$ 는 電子 電荷量의 絕對值이다. 式(3)으로 表示되는 Helmholtz-Smoluchowski 方程式은 대부분의 실제적인 實驗 및 解析에 無理없이 適用 된다.<sup>16)</sup>

## III. 半導體 試料 및 實驗 方法

### 1. 半導體 試料 및 電解質

半導體 試料로는 相異한 空間電荷 效果를 考慮하여 基本半導體로서 도핑된 실리콘半導體를 使用 하였다. p形은 boron 原子로 ( $1.9 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ ) 도핑 되었으며 n形은 phosphorus 原子로 ( $3.4 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ ) 도핑된 wafer를 使用하였다. 極小電氣泳動 測定에 適合하게 하기爲하여 半導體 粒子는 高強度의 세라믹(alumina) 乳鉢에 研磨하여 준비한 후 標準體(325mesh)로 샘플링하였다. 샘플링된 실리콘粒子의 分析은 美國 Micromeritics社의 Sedigraph 5000D 粒子分析機를 使用하였으며 粒子크기의 分布는 그림2와 같다. 그림에서 수직축은 累積質量 百分率을, 수평축은 실리콘粒子의 直徑을 나타낸다. 最終的으로 極小電氣泳動 測定에 使用된 실리콘粒子의 크기와 濃度の 近似値는 各各  $1.5\mu\text{m}$ 와  $1.0 \times 10^{-5} \text{g/ml}$ 이었다.

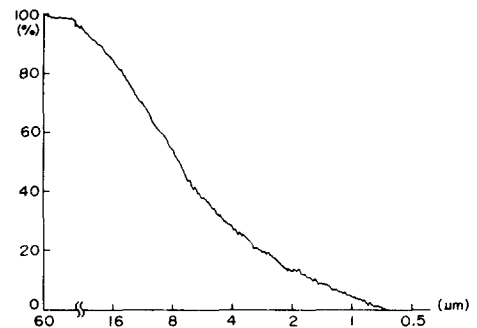


그림 2. 累積分布曲線에 依한 실리콘粒子 크기의 分布  
Fig. 2. A distribution of the silicon particle sizes as a cumulative distribution curve.

電解質은 도핑된 실리콘 粒子 表面에 吸着 또는 吸引된 이온電荷의 電氣極性과 1:1이온價에 依한 電氣二重層 構造와 空間電荷 및 表面電荷 效果 등을 考慮하여 KCl溶液을, 等電點(isoelectric point; IEP)과  $H^+$  및  $OH^-$  이온에 依한 吸着 效果등을 考慮하여 pH緩衝溶液(buffer solution)을 各各 使用하였다.

### 2. 極小電氣泳動 測定

一般的으로 半導體가 갖는 表面準位의 弛緩時間

(relaxation time)<sup>119)</sup>을 考慮하여 샘플링된 실리콘粒자를 電解質內에 浮遊시킨 懸濁液은 90分 以上 振盪器로 振盪하였으며, 이러한 過程에서 極小電氣泳動에 適合하지 않은 粒子들은 沈澱 分離되는 效果도 얻었다. 잘 振盪된 懸濁液은 矩形斷面積(1mm×10mm)을 갖는 平面電解槽에 넣은 後, 白金電極을 使用하여 外部電界를 電解槽內에 인가하였다. 平面電解槽의 內面과 電解質의 接觸 界面에서 自然 發生되는 電位差에 依한 流體 移動 效果를<sup>120)</sup> 考慮하여 外部電界가 인가되지 않았을 때 使用된 平面電解槽內의 流體 即 電解質 移動速度가 零인 位置인 停狀準位(stationary level)는 Komagata方程式에 依하여 다음과 같이 주어진다.<sup>121)</sup>

$$\frac{s}{d} = 0.500 - \left[ 0.0833 + \frac{32d}{\pi^2 l} \right]^{1/2} \quad (7)$$

여기서 s는 平面電解槽內 前面(또는 後面)으로부터 停狀準位까지 거리, d는 平面電解槽의 內幅, l은 平面電解槽內의 높이를 各各 表示한다. 使用된 平面電解槽의 d는 1mm, l은 10mm, 따라서 停狀準位 s는 0.194mm이며 美國Starrett社의 高精度마이크로미터(0.002mm/division)를 使用하여 決定하였다. 帶電된 p形 및 n形 실리콘粒자의 停狀準位에서 漂移速度는 英國 Bank Brothers社 Mark II 極小電氣泳動 測定 裝置로 各各의 測定點에서 20番 以上 測定하여 그 平均値를 利用하였다. 그림 3은 極小電氣泳動 測定 裝置의 概略圖로서 動作原理는 여러 文獻에서 찾아 볼 수 있다.<sup>122)</sup>

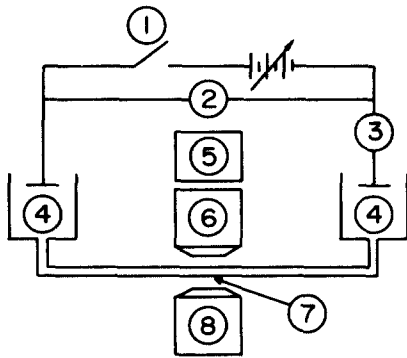


그림 3. 極小電氣泳動測定 裝置의 概略圖  
 ① 스위치 ② 電壓計 ③ 電流計 ④ 白金電極  
 ⑤ 光源 ⑥ 暗界콘덴서 ⑦ 平面電解槽 ⑧ 顯微鏡

Fig. 3. A schematic diagram of microelectrophoresis measurement apparatus.  
 ① switch ② voltmeter ③ ammeter  
 ④ platinum electrodes ⑤ light source ⑥ dark field condenser ⑦ flat cell ⑧ microscope

#### IV. 實驗 結果

常溫 同條件下에서 測定된 p形 및 n形 실리콘粒자의 表面電荷 및 제타電位 極性は KCl溶液과 pH溶液 모두 正이었다. KCl溶液內에서 p形 및 n形 실리콘粒자의 電氣泳動 移動度の 範圍는 各各  $5.5-8.9 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 와  $4.2-7.9 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 이었다. 이에 相應하는 제타電位는 Helmholtz-Smoluchowski 方程式(3)에 依하여 決定되며 範圍는 各各 70.4-114.0 mV와 53.9-101.2mV이다. KCl溶液的 log mole 濃度와 제타電位 關係는 그림 4에 圖示되었으며 p形 및 n形 실리콘의 最大제타電位는 모두  $10^{-2} \text{ M}$  부근에서 測定되었다. 反面에 pH溶液內에서 p形 및 n形 실리콘粒자의 電氣泳動 移動度 範圍는  $1.1 \times 10^{-4}-2.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 와  $0-2.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 이었다. 相應하는 제타電位는 各各 14.1-281.6mV와 0-268.8mV이다. 그림 5는 pH와 제타電位의 關係를 보여주며 n形 실리콘粒자의 等電點(IEP)은 pH7 부근에서 觀測 되었다.

#### V. 제타電位 考察

一般的으로 도핑된 半導體의 空間電荷層은 表面의 靜電氣的 또는 化學的 吸着 등을 고려치 않으면 自由搬送子の 空乏에 起因하여 p形 半導體는 負로 n形 半導體는 正으로 各各 帶電된다. 따라서, p形과 n形 실리콘半導體의 電氣泳動 移動도와 제타電位 極性は 서로 反對가 되어야 한다. 그러나 이러한 豫測과는 달리 KCl 및 pH溶液 모두 正이었다. 即 實驗結果는 도핑된 실리콘半導體의 形(p 또는 n)에 相關없이 粒子表面은 正, 그 周圍 擴散二重層은 負로 各各 帶電되어 있음을 定性的으로 보여 주었다. 따라서 KCl溶液內의 正

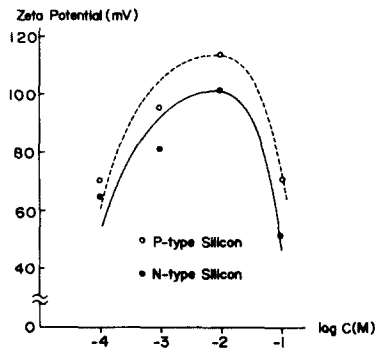


그림 4. 도핑된 실리콘半導體의 제타 電位에 對한 log mole 濃度の 效果

Fig. 4. The effect of log molar concentrations for zeta potentials of the doped silicon semiconductors.

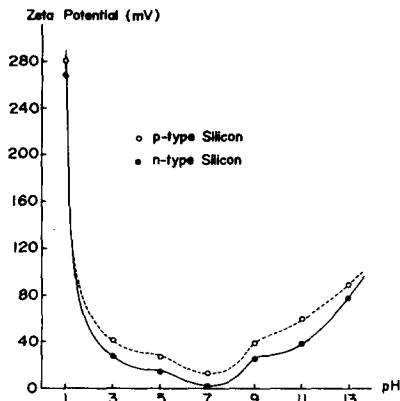


그림 5. 도핑된 실리콘半導體의 제타電位에 對한 pH效果

Fig. 5. The effect of the pH for the zeta potentials of the doped silicon semiconductors.

으로 帶電된  $K^+$ 이온은 실리콘半導體內의 空間電荷層과 空間電荷에는 별상관없이 強하게 表面에 吸着된다고 推定할 수 있다. 그림 4의 實驗結果로부터 실리콘半導體와 KCl溶液 界面現象은  $K^+$ 이온의 吸着效果和 電氣二重層 構造로써 다음과 같이 定性的 解析을 할 수 있다. 底濃度の KCl溶液에서, 化學적으로 吸着된  $K^+$ 이온량은 적으므로 擴散二重層內에 靜電氣적으로 吸引된  $Cl^-$ 이온량도 적게 된다. 따라서 式(6)의 逆數로 表示되는 Debye 길이에 比例하는 긴(두꺼운) 擴散二重層 構造를 가짐에도 불구하고 제타電位는 낮게 된다. KCl溶液 濃도가 커지면 擴散二重層內에 靜電吸引되는  $Cl^-$ 이온량도 增加하므로 제타電位도 커진다. 그러나 KCl溶液 濃도가 限界值 以上으로 커지면 表面에 吸着된  $K^+$ 이온은 飽和 蓄積되기 시작하여 이온세기의 增加에 의한 Debye 길이 및 擴散二重層 構造의 收縮에 따라서 마침내 제타電位는 減少하게 된다.

그림 5의 實驗結果로부터도 도핑된 실리콘粒子的의 表面과 擴散二重層은 空間電荷層과 空間電荷, pH값에 相關없이 各各 正 및 負로 帶電되어 있음을 定性的으로 理解할 수 있다. 反面에 제타電位가 零이 되는 等電點이 n形 실리콘半導體에서 pH7일때 觀測되었으나, 一般적인 세라믹(例;  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  등)<sup>12)</sup>에서 나타나는 等電點을 前後로 한 제타電位 極性的 變化는 觀測되지 않았다. 만일 pH緩衝溶液內에  $H^+$ 와  $OH^-$ 이온만이 存在한다면  $H^+$ 이온만이 도핑된 실리콘半導體의 表面準位와 表面電荷를 支配하며, 실리콘半導體의 空間電荷와 pH값에 關係없이 제타電位の 極성이 正임은  $H^+$ 이온(또는 다른 陽이온)의 表面 吸着은 靜電氣의 이 아닌

化學的 要因 때문으로 解析할 수 있다. 一般的으로 帶電된 이온의 化學的 吸着은 靜電氣의 吸着보다 매우 強하며 帶電된 固體(半導體)의 表面電氣極성과 同一極性이라도 吸着은 계속 維持된다.<sup>12)</sup> pH 1-7 範圍에서 실리콘半導體 表面에 吸着된  $H^+$ 이온은 pH값의 增加에 따라 減少하므로 擴散二重層內에 靜電氣적으로 吸引되는  $OH^-$ 이온량도 減少하므로 結局 제타電位는 最小值 또는 等電點(IEP)으로 減少하게 된다. 그러나 pH 8-13 範圍에서는, 앞에서 이미 指摘한 바와 같이, 豫測과는 달리 제타電位の 極性 變化도 없었으며 크기도 pH값의 增加( $OH^-$ 이온량의 增加)에 따라 커지는 界面現象을 보였다. 특히 pH 8-13인 알칼리성 溶液에서 실리콘表面의 酸化膜 溶解現象은<sup>12)</sup> KCl溶液의 경우보다 界面現象 解析에 더 큰 어려움이 있다.

같은 條件下에서 p形 실리콘의 제타電位가 n形에 比하여 相對적으로 컸던 것은 p形 실리콘半導體의 도핑濃도가 n形 보다 높았으며, 또한 p形 실리콘半導體內의 負 空間電荷와 陽이온( $K^+$ ,  $H^+$ )과의 靜電吸引力에 起因한 擴散二重層內의  $Cl^-$  또는  $OH^-$ 이온량의 增加때문이라 解析된다.

以上的 實驗結果 考察에서 도핑된 실리콘半導體와 電解質 接觸 界面에서 不可避하게 形成되는 表面의 酸化膜 및 光 效果 등은 既存의 極小電氣泳動 測定 方法과 裝置로는 解析하기 어려우며 바로 이러한 어려움 때문에 粒子半導體의 界面現象에 關한 研究報告가 거의 없었다고 思慮된다.<sup>15,16)</sup>

## VI. 結 論

도핑된 실리콘半導體의 제타電位, 電氣二重層 構造와 特性등에 關한 界面現象은 半導體의 도핑不純物, 種類, 濃度, 空間電荷( $Q_{sc}$ )보다는 半導體 表面의 表面準位內에 存在하는 表面電荷( $Q_{ss}$ )에 依하여 決定되며 특히 電解質로부터 半導體 表面에 吸着된 陽이온( $K^+$ ,  $H^+$ )에 依한 表面電荷( $Q_{ssa}$ )의 영향이 決定的이다. 따라서 眞性表面準位에 依한 表面電荷( $Q_{ss}$ )效果는 相對적으로 弱화된다. 실리콘半導體 表面의 陽이온 吸着은 化學的 吸着이며 半導體內의 空間電荷層도 變形(蓄積, 反轉)된다. 그리고 아직은 研究 報告되지 않고 있으나 定性的 解析에 뒤따른 定量的 解析, 界面의 酸化膜, 光 效果, 새로운 極小電氣泳動 測定 方法과 裝置 開發등에 關한 研究 등은 半導體 콜로이드科學 分野의 主要 課題이다.

## 參 考 文 獻

- [1] W.H. Brattain and C.G.B. Garrett, "Experiments on the interface between germanium

- and an electrolyte" B.S.T.J., vol.34, 129, 1955.
- [2] For example: Y.Y. Gurevich and Y.V. Pleskov, In "Semiconductors and semi-metals," R.K. Willardson and A.C. Beer, Eds. Academic Press, New York, vol.19, pp.255-328, 1983.
- [3] V.A. Myamlin and Y.V. Pleskov, "Electrochemistry of semiconductors", Plenum, New York, pp.172-177, 1967.
- [4] A. Fujishima and K. Honda, "Semiconductor liquid junction solar cells," Nature London, 238, 37, 1972.
- [5] A.C. Zettlemoyer, "Editors in chief: journal of colloid and interface science," private communication, Sep., 1985.
- [6] J.H. Chun, "The effect of adsorption of Ions at the silicon-KCl solution interface," J. Colloid Interface Sci., 113, 292, 1986.
- [7] 千長鎬, "Doping된 Silicon半導體와 傳導性溶液接觸 境界面에서 空間電荷의 效果" 大韓電子工學會 夏季綜合學術 論文集, vol. 9, no. 1, 301, 1986.
- [8] S. Goldberg, U.S., Salinity Lab., Private communication, Sep. 1986.
- [9] J. Kiwi, "Federal Inst. of Tech., Switzerland," Private communication Oct. 1986.
- [10] J. O'm. Bockris et al., Eds., "Comprehensive Treatise of Electrochemistry," The Double Layer, Plenum, New York, vol.1 1980.
- [11] C.S. Hirtzel and Raj Rajagopalan, "Colloidal phenomena; advanced topics," Noyes, New Jersey, U.S.A., 1985.
- [12] F. Cordon et al. Eds., "Photovoltaic and photoelectro chemical Solar energy conversion," Plenum, New York, 1981.
- [13] M. Schiavello, Ed., "Photoelectrochemistry photocatalysis and photoreactors," Reidel, Dordrecht, Holland, 1985.
- [14] H.I. Refioglou, Ed., "Electronic displays," Wiley, New York, pp.137-173, 1983.
- [15] F.L. Carter, Ed., "Molecular electronic," Devices Dekker, New York, 1982.
- [16] A. Kitahara and A. Watanabe, Eds., Electrical Phenomena at Interfaces, Dekker, New York, pp.102-115, 1984.
- [17] R.J. Hunter, "Zeta Potential in Colloid Science," Academic Press, London, pp. 59-64, 1981.
- [18] S. Hachisu, In, Electrical Phenomena at Interfaces, A. Kitahara and A. Watanabe, Eds. Dekker, New York, pp.99-117, 1984.
- [19] V.A. Myamlin and Y.V. Pleskov, *ibid.*, Plenum, New York, pp.11-12, 1967.
- [20] R.J. Hunter, *ibid.*, Academic Press, London, pp.126-136, 1981.
- [21] S. Komagata, "Kaimen Denki Kagaku Gaiyo," Shokodo, Tokyo, pp.63, 1953.
- [22] R.J. Hunter, *ibid.*, Academic Press, London, pp.150-174, 1981.
- [23] R.J. Hunter, *ibid.*, Academic Press, London, pp.230-231, 1981.
- [24] R.J. Hunter, *ibid.*, Academic Press, London, pp.233-235, 1981.
- [25] V.A. Myamlin and Y.V. Pleskov, *ibid.*, Plenum, New York, pp.86-90, 1967. \*

#### 感謝의 글

本 研究에 도움을 주신 Dr. A. C. Zettlemoyer (Sinclair Lab., Lehigh Univ., U. S. A.), 閔碩基傳士님 (半導體材料 研究室, KAIST), 李永吉代理 (三星電子 中央研究所), 秦周鉉主任 (三星半導體 研究開發室), 김미경氏 (韓國化學 研究所), 그리고 研究費 支援을 하여 주신 韓國科學材團에 感謝를 드립니다.