

Doping된 Si 半導體 界面에서 pH 效果

(pH Effects at Doped Si Semiconductor Interfaces)

千 長 鎬* 羅 克 煥*

(Jang Ho Chun and Keuk Hwan Ra)

要 約

도핑된 Si 半導體/pH 緩衝溶液 界面에서 H^+ 및 OH^- 이온濃度 效果를 循環 電流-電壓特性으로 研究調查하였다. 相反되게 도핑된 (p형, n형) Si 半導體에 관한 空間電荷 效果는 界面的 pH 效果와 緩行表面準位를 研究하는데 有效하게 應用될 수 있다. 도핑된 Si 半導體 表面에 吸着된 H^+ 및 OH^- 이온은 化學的 吸着이라기보다는 物理的 吸着이다. 吸着過程과 緩行表面準位 充電效果는 界面에서 電位障壁變化 및 關聯된 電流-電壓特性으로 說明될 수 있다. 順方向 바이어스時, p형과 n형 Si 半導體 表面에서 充電된 緩行表面準位는 各各 도너와 억셉터 緩行表面準位이다. 도핑된 Si 半導體 界面에서 緩行表面準位에 關한 少數搬送子 效果는 無視할 수 있다.

Abstract

The effect of H^+ and OH^- ion concentrations at doped Si semiconductor/pH buffer solution interfaces were investigated in terms of cyclic current-voltage characteristics. The effects of space charges on oppositely doped Si semiconductors, i.e., p- and n-Si semiconductors, can be effectively applied to study the pH effects and the slow surface states at the interfaces. The adsorptions of H^+ and OH^- ions on the doped Si semiconductor surfaces are physical adsorption rather than chemical adsorption. Adsorptive processes and charging effects of the slow surface states can be explained as the potential barrier variations and the related current-voltage characteristics at the interfaces. Under forward bias, the charged slow surface states on the p- and n-Si semiconductor surfaces are donor and acceptor slow surface states, respectively. The effects of minority carriers on the slow surface states can be neglected at the doped Si semiconductor interfaces.

I. 序 論

半導體 wafer, 半導體 電極, 半導體 薄膜 (thin film), IC 製造工程 등에서 必須的인 工程段階中的의 하나는 表面蝕刻 (etching) 과 蒸溜水에 의한 表面洗滌過程이

다. 또한 半導體 電氣 및 物理化學에서 물 (H_2O) 과 물을 溶媒 (solvent)로 하는 水性 (aqueous) 電解質의 物理化學的 機能과 役割을 考慮한 半導體/電解質 界面에서 H^+ 및 OH^- 이온濃度 (pH) 效果는^[1-3] 매우 重要한 研究課題가 되어왔다. 일반적으로 도핑된 半導體와 電解質이 接觸하면 서로 다른 電氣化學的 位置 에너지 (electrochemical potential energy) 差에 의한 電荷 搬送子와 이온의 漂移, 擴散, 配列分布는 平衡狀態에 到達할 때까지 繼續되어 半導體 內에는 空間電

*正會員, 光云大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kwangwoon Univ.)
接受日字: 1990年 8月 13日

荷層(空乏層), 半導體 表面에는 表面準位(surface states), 電解質 內에는 吸着 및 靜電氣의 誘導 分布된 이온에 의한 Helmholtz 二重層과 擴散(diffuse) 二重層이 形成된다. 特히 도핑된 半導體는 金屬과 달리 도핑된 不純物(dopant)에 따라 相反 또는 相補하는 電氣物理의 特性, 即 多數 및 少數 搬送子, 空間電荷 및 空間電荷層, acceptor 및 donor 表面準位와 表面電荷 등을 갖게된다. 따라서 이렇게 相反 또는 相補하는 電氣物理의 特性은 pn 및 np 接合, 順方向 및 逆方向 bias 電壓과 같은 電子工學的 側面的 應用은 勿論, 異種電荷와 同種電荷間의 相互作用에 依한 coulomb 吸引力과 反撥力 關係와 같은 基本的인 靜電氣力 現象에도 應用할 수 있다.^[45] 따라서 本論文에서는 基本半導體로서 가장 널리 쓰이고 있는 p形 및 n形 Si 半導體와 pH 緩衝(buffer) 溶液을 使用하여 空間電荷와 多數 搬送子 效果, 接合面構造, 整流特性, H⁺ 및 OH⁻ 이온 濃度效果, 吸着過程, Helmholtz 二重層과 緩行表面準位 關係, 充電된 緩行表面準位 種類와 電位障壁效果에 미치는 影響들을 連續循環電壓(continuous cyclic voltammetric) 測定方法으로 實驗과 解析을 하였다.

II. 表面準位와 表面電荷

도핑된 半導體와 電解質 界面의 構造 및 分布電荷는 一般的으로 다음과 같이 構成되어진다. 도핑된 半導體表面 밑의 이온화된 不純物(dopant)과 多數 搬送子の 枯乏(空乏)에 起因한 空間電荷層(空乏層)과 空間電荷(Q_{sc}), 半導體 表面結晶格子 原子의 非週期性和 缺陷에 起因한 急行表面準位(fast surface states)와 急行表面電荷(Q_{ss}), 電解質로부터 半導體 表面에 化學的 또는 物理的(靜電氣的)으로 吸着된 이온에 起因한 緩行表面準位(slow surface states)와 緩行表面電荷(Q_{sss}); 電解質 內에 形成된 電氣二重層과 이온電荷, 즉 Helmholtz 二重層과 吸着 및 密集 이온電荷(Q_{ein}), 擴散 二重層과 擴散 이온電荷(Q_{eid})로 이루어져 있다. 特히 表面準位는 半導體物理學 分野와는 달리 電氣化學觀點에서는 學際(interdisciplinary) 間 研究分野가 갖는 어려움으로 인하여 그 重要性에 比하여 相對的으로 적은 關心과 研究報告만이 있었다고 생각된다. 金屬과는 달리 半導體表面에 形成되는 表面準位는 禁止帶, 即 에너지 갭(energy gap) 內에 存在하는 에너지 準位로 表示되며 도핑된 不純物 半導體 內의 acceptor 또는 donor 準位와 類似하다. 表面準位の 形成過程과 表面準位 內에 充電(帶電)된 表面電荷의 弛緩時間(relaxation time)에 따라 急行

表面準位(弛緩時間: 10⁻⁶—10⁻³秒)와 緩行表面準位(弛緩時間: 分—時間)로 分類할 수 있다.^[6] 急行表面準位는 半導體 表面結晶格子 原子의 非週期性和 缺陷에 起因하므로, 空間電荷層(空乏層)과 空間電荷層內의 電位分布는 一次的으로 急行表面準位密度(<10¹⁰/cm²)와 急行表面電荷에 依하여 決定된다. 反面에 電解質로부터 半導體表面에 吸着된 이온에 起因하는 緩行表面準位密度(>10¹³/cm²)와 電氣物理의 特性은 吸着 이온의 種類와 濃度, 過程등에 따라 決定되며 充電된 電荷種類에 따라 陰으로 充電된 acceptor와 陽으로 充電된 donor 緩行表面準位로 分類된다.^[6] 換言하면, 緩行表面準位는 吸着過程과 Helmholtz 二重層에 起因된다. 一般的으로 吸着過程에서 表面準位密度와 弛緩時間을 考慮하면, 急行表面準位效果는 大部分의 半導體/電解質 界面에서 無視할 수 있다. 따라서 急行表面準位 弛緩時間과 電解質 內에서 일어나는 吸着過程, 即 이온 移動度(~10⁻³cm²/V·s)와 擴散係數(~10⁻⁶cm²/s)를 考慮하면^[7] 初期段階에 關한 境界條件과 그에 關係된 界面電荷關係式的 區分은^[8] 解析上 無理와 異論이 있을뿐만 아니라 循環電壓(cyclic voltammetric) 方法과 技術에 依한 普遍妥當性있는 實驗的 資料提示도 어렵다고 생각된다. 따라서 平衡狀態 일때, 界面의 電氣의 中性條件에 따른 界面電荷關係式的 境界條件은 緩行表面準位の 電氣의 中性 또는 充電된 狀態로서 區分하는 것이 보다 現象論理的이며 實驗的 提示도 容易하다고 判斷된다. 이제 充電되어 있지 않는 緩行表面準位(電子가 채워지지 않은 acceptor 緩行表面準位 또는 電子로 채워진 donor 緩行表面準位), 즉 電氣의 中性인 平衡狀態일때 界面의 電氣의 中性條件에 따른 電荷關係 近似式은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_{sc} + Q_{ein} + Q_{eid} \approx 0$$

$$\text{또는 } Q_{sc} \approx -(Q_{ein} + Q_{eid}) \quad (1)$$

式(1)에서 Q_{sc}와 (Q_{ein}+Q_{eid})는 異種電荷關係 및 靜電氣的으로 吸引力, 即 物理的 吸着過程에 依한 分布電荷로서 典型的인 pn(또는 np)接合構造를 意味한다. 따라서 初期 充電時(例: 1st scan), 이러한 界面에서는 典型的인 pn 接合 半導體 diode와 같은 電流-電壓特性曲線을 구할 수 있다. 다음, 外部로부터 이러한 界面에 順方向 bias 電壓이 인가되었다고 假定하면 式(1)에 依한 界面 內의 built-in 電位와 그에 따른 電位障壁이 消滅되므로 緩行表面準位는 多數搬送子로 이루어진 順方向 電流로 充電되기 시작하여 半導體 表面은 充電된 緩行表面電荷(Q_{sss})에 依하여

外部 電界로부터 遮蔽된다. 換言하면, 吸着이온濃度와 狀態에 따라, 即 緩行表面準位 密度와 特性에 따라 界面通過 順方向電流는 減少 및 遮斷되어, 結局은 充電된 緩行表面準位를 갖는 平衡狀態가 된다. 이때, 界面電荷 關係式은 다음과 같은 近似式으로 쓸 수 있다.

$$Q_{sc} + Q_{sss} + Q_{e1h} + Q_{e1d} \approx 0 \quad (2)$$

正常的으로 도핑된 半導體 界面의 경우, 空間電荷 層 內的 空間電荷(Q_{sc})와 緩行表面準位 內에 充電된 多數搬送子인 緩行表面電荷(Q_{sss})는 異種電荷가 되므로 式(2)는 다음과 같이 變形할 수 있다.

$$Q_{sc} \approx -(Q_{sss} + Q_{e1h} + Q_{e1d}) \quad (3)$$

換言하면, 式(1)에 比하여 增加된 Q_{sss} 에 相應하는 空間電荷의 增加와 이에 따른 空間電荷層의 擴張 또는 에너지 밴드의 屈曲(bending) 增加現象이 있게 되며 界面의 電位障壁 增加效果로 나타난다. 勿論, 緩行表面準位 形成의 要因이 되는 이런 吸着過程과 Helmholtz 二重層을 減少시키는 表面溶解 또는 이온 分離現象이 있게 되면 一定한 또는 增加되는 界面通過 順方向電流를 期待할 수 있다.⁹⁾ 卽으로, 電氣의 中性이던 緩行表面準位가 少數搬送子에 依하여 充電되었다고 假定하면 多數搬送子의 境愚와는 正反對로 空間電荷層 內的 空間電荷(Q_{sc})와 充電된 緩行表面電荷(Q_{sss})는 同種 電荷이므로 界面電荷 關係式은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q_{sc} + Q_{sss} + Q_{e1h} + Q_{e1d} \approx 0$$

$$\text{또는 } (Q_{sc} + Q_{sss}) \approx -(Q_{e1h} + Q_{e1d}) \quad (4)$$

그러나 正常的으로 도핑된 半導體에서는 少數搬送子의 濃度는 無視할 수 있으므로 順方向 bias 電壓時는 勿論, 逆方向 bias 電壓時에도 그 效果는 期待하기 어렵다. 그림 1 과 2는 各各 多數搬送子와 少數搬送子에 依하여 充電된 緩行表面準位를 갖는 에너지 밴드와 電氣二重層 構造를 概略的으로 보여준다. 여기서 E_c 는 傳導帶 內的 最低 에너지準位, E_f 는 fermi 準位, E_v 는 價電帶 內的 最高 에너지準位를 나타내며 界面에서 있을 수 있는 酸化膜은 緩行表面準位 形成에 必要要因이 아니므로¹⁰⁾ 그림 1 과 2에서 省略하였다.

III. 實驗 및 結果考察

1. 半導體 電極 및 pH 緩衝溶液

Acceptor 不純物(Boron: $2.0 \times 10^{15}/\text{cm}^3$)과 donor 不純物(Phosphorus: $2.3 \times 10^{15}/\text{cm}^3$)로 各各 도핑된 Si單結晶(100)을 p형 Si과 n형 Si 半導體電極 試料로 使

用하였다. 各各의 p형 Si과 n형 Si 半導體 電極試料는 室溫의 1HF:3HNO₃ 蝕刻溶液(etchant)內에서 2分間 蝕刻하여 純粹한 電極表面을 만들었다. 抵抗性 接觸은 일函數(work function)가 낮으며 軟性과 퍼짐성이 좋은 In^{11,12)}과 傳導性 銀 接着劑를 使用하였다. 또한 pH 緩衝溶液과 接觸될 電極表面을 除外한 모든 部分은 유리管과 絶緣性 epoxy로 二重密封하였다. 最終的으로 製作된 p형 Si과 n형 Si 半導體電極 表面積은 各各 0.11cm²와 0.18cm² 이었다. 電解質 溶液으로는 正反對로 도핑된 Si 半導體의 空間電荷와 H⁺ 및 OH⁻ 이온 濃度效果, 即 pH 效果를 研究調查하기 위하여 pH 1, 7, 13 緩衝(buffer)濃液을 使用하였다.

2. 實驗方法

모든 實驗은 室溫의 暗室內에서 pyrex 電解槽를

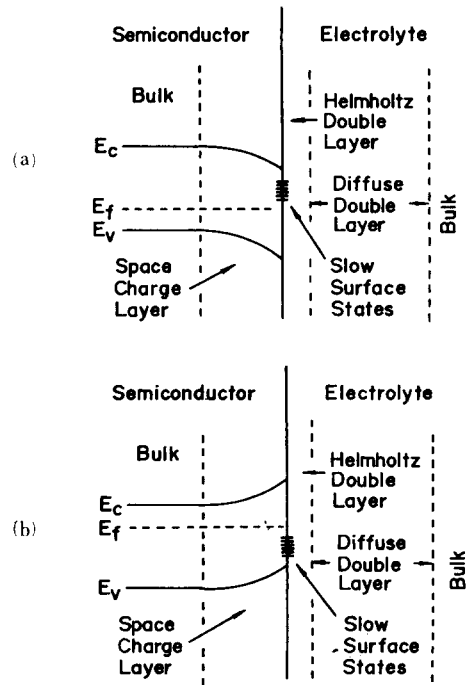


그림 1. 界面에서 에너지 밴드와 電氣二重層 概略圖 (a) donor 緩行表面準位를 갖는 p형 半導體 (b) acceptor 緩行表面準位를 갖는 n형 半導體

Fig. 1. Schematic energy band diagrams and electrical double layers at the interfaces. (a) a p-type semiconductor with donor slow surface states, (b) an n-type semiconductor with acceptor slow surface states.

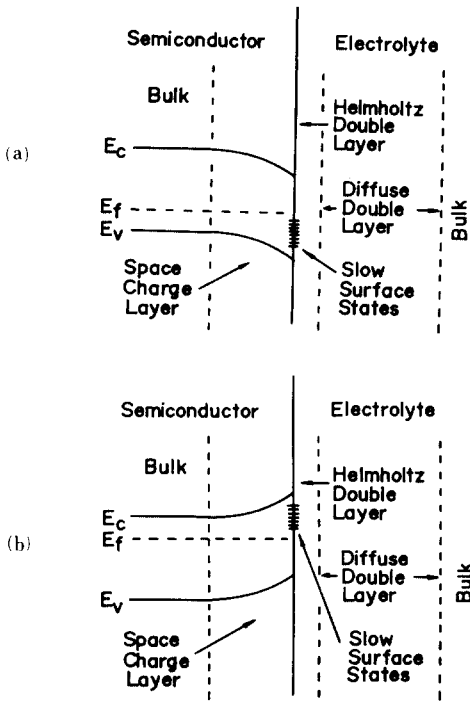


그림 2. 界面에서 에너지 밴드와 전기 이중층 概略圖
 (a) acceptor 緩行表面準位를 갖는 p형 半導體
 (b) donor 緩行表面準位를 갖는 n형 半導體

Fig. 2. Schematic energy band diagrams and electrical double layers at the interfaces.
 (a) a p-type semiconductor with acceptor slow surface states,
 (b) an n-type semiconductor with donor slow surface states

使用하여 標準三電極 配置構造를 따랐다. 換言하면, p형 또는 n형 Si 半導體는 일電極(WE:working electrode), SCE(saturated calomel electrode)는 基準電極(RE:reference electrode),¹³⁾白金(Pt)은 相對電極(CE:counter electrode)으로 使用하여 外部負荷 없는 電氣化學的 回路를 構成하였다. 電極의 連續循環線型電位는 미국 PINE社의 RDE4 電位計를 使用하여 인가시켰으며 測定되는 循環電流-電壓特性曲線은 미국 Houston社의 Omnigraphic 2000 X-Y 記錄計를 使用하였다. 動作 스캔電位(scan potential)와 스캔率(scan rate)은 各各 $-1.0 \sim +1.0$ (V vs. SCE) 와 100mV/s 이었다.

3. 實驗結果 및 考察

그림 3(a)와 (b)는 各各 p형 Si과 n형 Si 半導體와 pH 1 緩衝溶液 界面에서의 典型的인 循環電流-電壓

特性曲線, 即 pn 接合과 np 接合 整流特性을 보여준다. 換言하면, 順方向 bias 電壓時에는 順方向 電流가 界面을 통하여 흐르고 逆方向 bias 電壓時에는 界面에 形成된 内部電界에 依하여 界面通過電流는 遮斷狀態가 되어 微小한 逆飽和電流(reverse saturation current)만이 있게된다. 먼저 p형 Si 半導體 電極과 pH 緩衝溶液 界面에서 일어나는 吸着過程을 解析해 보자. p형 Si 半導體界面에서는 陰으로 イオン化된 acceptor 不純物(B⁻)에 依하여 靜電氣的으로 誘導된 H⁺ 이온의 吸着過程과 Helmholtz 二重層에 起因된 電氣的 中性인 緩行表面準位가 p형 Si 半導體 表面

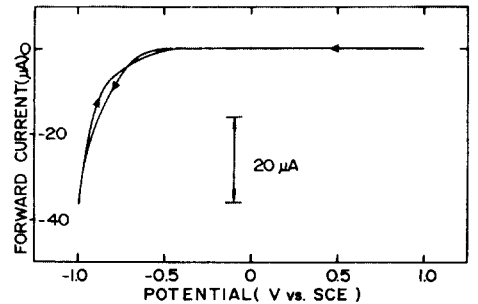
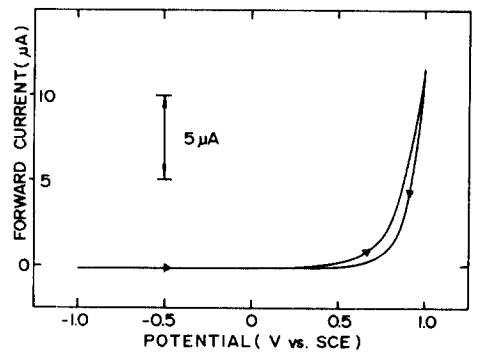


그림 3. 도핑된 Si 半導體와 pH 1 緩衝溶液界面에서 典型的인 暗電流循環電壓圖(스캔電位: $-1.0 \sim +1.0$ V vs. SCE, 스캔率: 100mV/s , 2번째 스캔)
 (a) p-형 Si 半導體
 (b) n-형 Si 半導體

Fig. 3. Cyclic voltammograms of a typical dark current at the doped Si semiconductor/pH 1 buffer solution interfaces.
 (scan potential: $-1.0 \sim +1.0$ V vs. SCE, scan rate: 100mV/s , 2nd scan)
 (a) the p-Si semiconductor,
 (b) the n-Si semiconductor.

에 나타나게 된다. 따라서 식(1)로 表示되는 分布電荷關係와 pn 接合構造를 갖게된다. pH 緩衝溶液的 H⁺ 이온濃도는 pH 番號 (pH ≡ -log₁₀ H⁺ 濃度)의 增加에 따라 對數函數의으로 減少하므로 pH 番號가 增加할수록 靜電氣的인 吸引力에 依하여 半導體 表面에 吸着되는 H⁺ 이온數가 減少하게 되어 吸着過程과 Helmholtz 二重層 形成에 起因한 電氣的 中性인 緩行 表面準位 密度는 減少한다.

이제 이러한 界面에 順方向 bias 電壓이 인가되면 多數搬送子인 正孔으로 構成된 順方向電流에 依하여 緩行表面準位는 充電되기 시작하여 式(3)과 같은 狀態가 된다. 電氣等價回路 觀點에서 보면 緩行表面準位는 容量(capacitance)成分으로서 充電時間과 充電된 緩行表面準位는 모두 表面電位障壁 效果로 解析된다. 換言하면, 充電된 緩行表面準位密度의 減少는 表面電位障壁 減少效果와 相應하므로 同一한 條件下에서 pH 番號가 增加할수록 界面通過 順方向電流는 增加變化한다. 그러나, 비록 順方向 bias 電壓時라도 容量 充電特性에 起因하여 最大 順方向電流는 pH 番號와 스캔時間(스캔回數)에 따라 그림 4(a)와 같이 減少變化하며 相應하는 에너지 밴드와 電氣二重層 構造는 그림 1(a)와 같다. 그림 4(a)와 (b)에서 最大 順方向電流는 連續 스캔時(-1.0 ~ +1.0V vs. SCE) 各各 스캔電位가 +1.0V vs. SCE와 -1.0V vs. SCE 인때의 順方向電流를 意味한다. 平衡狀態일 때 半導體의 mass action 法則에 따르면 使用된 p형 Si 半導體의 少數搬送子인 電子濃度(n₀)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$N_a n_0 \cong n_i^2$$

$$\text{또는 } n_0 \cong \frac{n_i^2}{N_a} \quad (5)$$

여기서 N_a는 이온화된 acceptor 不純物 濃度(2.0 × 10¹⁵/cm³)로서 多數搬送子인 正孔濃도에 相應하며, n_i는 純粹한 Si 半導體의 搬送子濃度(1.5 × 10¹⁰/cm³)이다.^[14] 따라서 少數搬送子인 電子濃度(1.1 × 10⁵/cm³)가 緩行表面準位の 充電에 미치는 影響은 無視하여도 되며 相應하는 에너지 밴드와 電氣二重層 構造는 그림 2(a)와 같다. 反面에 n형 Si 半導體와 pH 緩衝溶液의 境遇는 p형 Si 半導體와는 正反對로 解析을 하면된다. 即, 陽으로 이온화된 donor 不純物(P⁺)에 依하여 靜電氣的으로 吸引된 OH⁻이온의 吸着過程과 Helmholtz 二重層에 起因한 電氣的 中性인 緩行表面準位가 n형 Si 半導體表面에 나타난다. pH 番號의 增加에 따라 OH⁻ 이온濃도는 對數函數의으로 增加하므로 表面에 나타나는 緩行表面準位密度와 그에

다른 表面電位障壁 效果도 增加하게 되어 界面通過 電流는 減少하게 된다. 이제 이 界面에 p형 Si 半導體와 同一한 條件으로 順方向 bias 電壓을 인가시키면 多數搬送子인 電子에 依하여 緩行表面準位는 充電되기 시작한다. 따라서 pH 番號가 增加할수록 充電된 緩行表面準位 密度와 그에 따른 電位障壁效果도 增加하므로 p형 Si 半導體와는 正反對로 最大 順方向電流는 그림 4(b)와 같이 減少 變化하며 相應하는 에너지 밴드와 電氣二重層 構造는 그림 1(b)와 같게 된다. 또한 같은 解析方法으로 使用된 n형 Si 半導體의 少數搬送子인 正孔濃度(p₀)를 구하면 다음과 같다.

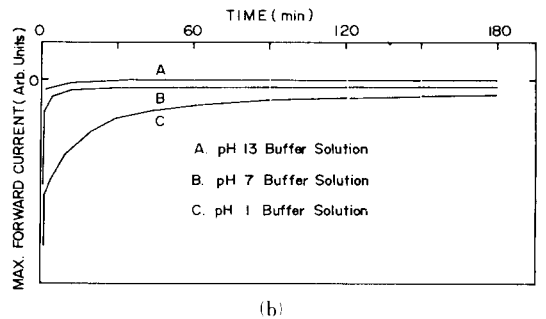
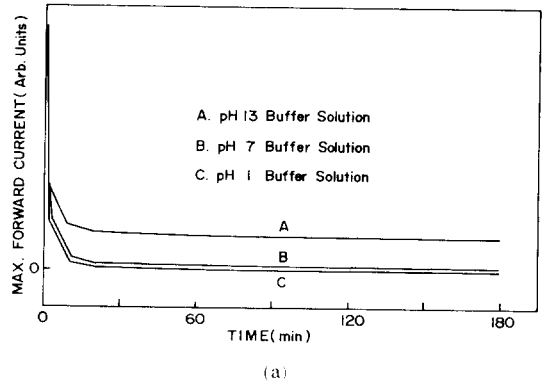


그림 4. 도핑된 Si 半導體와 pH 1, 7, 13 緩衝溶液 界面에서 最大 順方向 電流變化(스캔電位: -1.0 ~ +1.0V vs. SCE, 스캔率: 100mV/s, 連續 스캔)

(a) p-Si 半導體 (b) n-Si 半導體
 Fig. 4. Variations of maximum forward currents at the doped Si semiconductor/pH 1, 7, 13 buffer solution interfaces. (scan potential: -1.0 ~ +1.0V vs. SCE, scan rate: 100mV/s, continuously scanned)
 (a) p-Si semiconductor, (b) n-Si semiconductor.

$$N_a p_0 \cong n_i^2$$

$$\text{또는 } p_0 \cong \frac{n_i^2}{N_a} \quad (6)$$

여기서 N_a 는 이온화된 donor 불純物 濃度 ($2.3 \times 10^{15}/\text{cm}^3$)로서 多數搬送子인 電子濃도에 相應함으로 少數搬送子인 正孔 濃도는 ($1.0 \times 10^5/\text{cm}^3$)가 된다. 따라서 少數搬送子인 正孔 濃도가 緩行表面準位の 充電에 미치는 效果는 p形 Si 半導體와 마찬가지로 無視하여도 되며 相應하는 에너지 밴드와 電氣 二重層 構造는 그림 2(b)와 같다. 이러한 觀点에서 볼때, 參考文獻[8]에 提示된 界面電荷 關係近似式에 關한 內容과 에너지 밴드 및 電氣 二重層 構造는 그림 1(a)와 (b)의 境遇가 되어야 보다 現象論理的이며 適合하다. 또한 以上の 理論 및 實驗의 解析에서 있을 수 있는 一部 充電된 緩行表面準位와 酸化膜에 關한 境遇는 境界條件 適用과 實驗的 確認이 어려우며 連續循環 電壓 測定方法에 依한 定量的인 表面準位 解析에 關한 研究報告는 거의 없다고 判斷된다.^[6]

IV. 結 論

Acceptor 또는 donor 불純物로 도핑된 p形 또는 n形 半導體는 電子素子에 關한 電子工學的 應用側面 뿐만 아니라, 相反 및 相補되는 靜電氣의 物理特性은 界面科學에 關한 基礎研究에도 有效하게 利用할 수 있다. 도핑된 Si 半導體表面에 吸着되는 H^+ 및 OH^- 이온은 化學的 吸着이라기보다는 物理的 吸着이며 pH 效果는 界面構造 解析에 매우 有用하다. 도핑된 Si 半導體表面의 緩行表面準位는 空間電荷와 吸着된 이온의 相互作用에 起因된다. p形과 n形 Si 半導體 表面은 各各 陽으로 充電된 donor와 陰으로 充電된 acceptor 緩行表面準位에 依하여 主導된다. 多數搬送子에 依하여 緩行表面準位가 充電되면 空間電荷層의 擴張 또는 에너지 밴드의 屈曲 增加現象과 같은 界面 構造의 變化, 즉 表面電位障壁 增加에 따른 界面 通過電流 減少現象이 있게 된다. 吸着過程과 Helmholtz 二重層 形成, 充電된 緩行表面準位는 界面의 電位障壁 效果로 解析할 수 있다. 도핑된 Si 半導體 界面에서 緩行表面準位에 關한 少數搬送子 效果는 無視할 수 있다. 界面電荷 關係近似式에서 緩行表面準位

에 關한 境界條件은 電氣的 中性狀態와 充電된 狀態로 區分하는 것이 보다 合理的이다.

參 考 文 獻

- [1] V.A. Myamlin and Y.V. Pleskov, *Electrochemistry of semiconductors*, Plenum, New York, pp. 78-86, 1967.
- [2] Y.V. Pleskov and Y.Y. Gurevich, *Semiconductor photoelectrochemistry*, Plenum, New York, pp. 106-111, 1986.
- [3] A. Kitahara and A. Watanabe, ed., *Electrical phenomena at interfaces*, Dekker, New York, pp. 172-173, 278, 289, 1984.
- [4] J.H. Chun, *J. Colloid Interface Sci.*, 113, 292, 1986.
- [5] J.H. Chun, *J. Electrochem. Soc.*, 134, 3201, 1987.
- [6] A.R. Plummer, in *The electrochemistry of semiconductors*, P.J. Holmes, ed., Academic Press, pp. 72-77, 1962.
- [7] A.J. Bard and L.R. Faulkner, *Electrochemical methods*, Wiley, New York, pp. 127-134, 1980.
- [8] 千長鎬, 電子工學論文誌, 第27卷 7號, 61, 1990
- [9] 千長鎬, 電子工學論文誌, 第26卷 10號, 67, 1989.
- [10] V.F. Kiselev and O.V. Krylov, *Electronic phenomena in adsorption and catalysis on semiconductors and dielectrics*, Springer-Verlag, pp. 45-46, 1987.
- [11] W.C. Dunlap, Jr., *An introduction to semiconductors*, Wiley, New York, p. 192, 1957.
- [12] B.L. Sharma, in *Semiconductors and semimetals*, R.K. Willardson and A.C. Beer, Eds., Academic Press, New York, vol. 15, pp. 1-38, 1981.
- [13] A.J. Bard and L.R. Faulkner, *Electrochemical methods*, Wiley, New York, p. 3, 1980.
- [14] S.M. Sze, *Physics of semiconductor devices*, Wiley, New York, 2nd Ed., p. 850, 1981.
- [15] H.O. Finklea, Ed., *Semiconductor Electrodes*, Elsevier, Amsterdam, 1988.

著 者 紹 介

千 長 鎬 (正會員) 第25卷 第10號 參照
 현재 광운대학교 전자공학과 교수

羅 克 煥 (正會員) 第26卷 第12號 參照
 현재 광운대학교 전자공학과 교수