

Colloid 半導體 界面의 電氣化學的 現象에 關한 定性的 解析

(Qualitative Analysis on Electrochemical Phenomena at the Colloidal Semiconductor Interfaces)

千 長 鎬*

(Jang Ho Chun)

要 約

도핑된 실리콘半導體와 有機溶媒(C₆H₆, CH₃OH, C₂H₅OH) 界面의 空間電荷效果와 도핑되지 않은 多結晶 砒化갈리움半導體와 電解質(NaCl, KCl, KI 溶液) 界面의 제타電位 反轉現象을 極小電氣泳動 測定에 依하여 定性的인 解析을 하였다. 有機溶媒內的 空間電荷效果는 무시 할 수 있으며 제타電位 反轉現象은 도핑되지 않은 多結晶 砒化갈리움과 電解質 界面의 表面準位, 特性的 吸着, 電氣陰性度, 特性的으로 吸着된 이온의 크기에 따라 決定됨을 알았다. 콜로이드半導體의 剪斷面은 表面에서 固定된 거리에 位置하며 Helmholtz外面(OHP)에 거의 一致한다.

Abstract

A space charge effect at the doped silicon semiconductor/organic solvent (C₆H₆, CH₃OH, C₂H₅OH) interfaces and a mechanism for two reversals of zeta potentials at the undoped polycrystalline gallium arsenide semiconductor/electrolyte (NaCl, KCl, KI solution) interfaces has been qualitatively analyzed using microelectrophoresis measurements. It has been found that the space charge effect in the organic solvents can be neglected and the two reversals of zeta potentials depend on surface states, specific adsorption, electronegativity and size of specifically adsorbed ions at the undoped polycrystalline gallium arsenide/electrolyte interfaces. The position of shear plane of colloidal semiconductors is a fixed distance from the surface and is almost or exactly coincides with the outer Helmholtz plane (OHP).

I. 序 論

最近 數年동안 콜로이드半導體에 關한 應用은 化學物理, 光電氣化學, 콜로이드科學 分野등에 主要한 研究 關心事가 되어 왔으며,¹⁻⁵⁾ 특히 太陽 에너지의 光電氣 또는 化學的 變換에서 半導體 粒子의 機能은

光吸收 媒體, 電子도우너, 極小電極 등으로 매우 有用함이 밝혀져 왔다.⁶⁾ 半導體 界面現象은 半導體 또는 半導體酸化膜과 電解質 接合面의 이온吸着에 依하여 決定된다. 基本半導體(Si, Ge)와 III-V 族化合物半導體(GaAs, InSb)界面의 이온吸着에 關한 研究은 放射性追跡方法에 依하여 報告된바 있으나,^{7,8)} 電氣泳動 方法을 利用한 콜로이드半導體에 關한 界面現象은 거의 報告되지 아니하였다.^{9,10)} 도핑된 Si 半導體 界面의 Cl⁻ 이온 吸着에 따른 電氣二重層과 空

*正會員, 光云大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kwangwoon Univ.)
接受日字: 1988年 5月 4日

間電荷效果,⁹⁾ 도핑되지 않은 다결晶GaAs 半導體 界面의 제타(zeta)電位 反轉現象은 매우 特異하였다.¹⁰⁾ 따라서 本 論文에서는 電氣泳動方法에 依한 콜로이드半導體 界面의 特性的 吸着效果, 電氣二重層構造, 剪斷面位置 解析에 中點을 두었다. 도핑된 Si半導體와 有機溶媒(C₂H₆, CH₃OH, C₂H₅OH)界面의 電氣泳動移動도와 空間電荷關係를 解析하였다. 反面에 도핑되지 않은 다결晶 GaAs半導體와 電解質(NaCl, KCl, KI溶液)의 界面現象은 할로젠이온(Cl⁻, I⁻)의 特性的 吸着效果和 半導體表面準位 飽和에 따른 제타電位의 二次反轉現象 解析에 中點을 두었다.

콜로이드科學과 電氣泳動測定에 關한 理論 및 實驗의 限界性和 制約性을¹¹⁾ 考慮하여 定性的 解析을 하였다.

II. 界面電荷와 제타電位

1. 界面電荷

半導體와 電解質 界面의 電氣二重層은 半導體內의 空間電荷層, 半導體表面의 格子原子 缺陷과 非週期性에 起因한 眞性表面準位(急行準位), 半導體 또는 半導體酸化膜과 電解質 界面에 吸着된 이온 表面準位(緩行準位), 電解質內에 形成된 이온分布에 따른 密集(Helmholtz)二重層과 擴散(Gouy)二重層으로 區分할 수 있다. 酸化膜을 考慮한 도핑된 半導體와 電解質 界面의 概略的인 電氣二重層의 構造는 그림1과 같다. E_c는 傳導帶內의 最低에너지準位, E_f는 Fermi 준위, E_v는 價電帶內의 最高에너지準位를 各各 나타낸다.

一般的으로 半導體와 電解質 界面에서 空間電荷와 空間電荷效果는 表面電荷와 表面電荷效果에 比하여 매우 적으므로 無視할 수 있다. 따라서 平衡狀態下의 界面電荷關係式은 電氣의 中性條件에 따라 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

$$Q_{ss} = Q_{ssr} + Q_{sss} \tag{2}$$

$$Q_{ss} + Q_{el} = 0 \text{ 또는 } Q_{ss} = -Q_{el} \tag{3}$$

여기서 Q_{sc}는 空間電荷量, Q_{ss}는 總表面電荷量, Q_{el}은 密集 및 擴散二重層內의 總이온電荷量, Q_{ssr}는 急行準位內의 이온電荷量, Q_{sss}는 緩行準位內의 이온電荷量을 各各 나타낸다.

2. 제타電位

極小電氣泳動(microelectrophoresis)測定은 溶液內에 浮遊하는 콜로이드半導體의 表面電荷 決定 및 界面現象 解析에 매우 有用하다. 電解質의 擴散二重層內에 降下되는 電位는 그림 2에 圖示하였으며 一般的으로 電氣力動電位(electrokinetic potential), 即 제

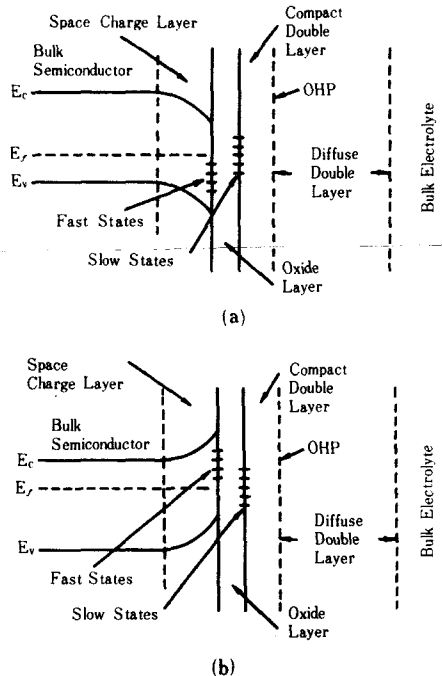


그림 1. 도핑된 半導體 酸化膜과 電解質 界面의 表面準位와 電氣二重層 概略圖

(a) p形 (b) n形 半導體

Fig. 1. A schematic picture of an electrical double layer and the surface states at the doped semiconductor oxide layer/electrolyte interface.

(a) A p-type.

(b) an n-type semiconductor.

타電位의 크기와 비슷하다. 換言하면 제타電位는 擴散二重層內의 이온電荷量에 依하여 決定되며 그 크기는 Helmholtz-smoluchowski 方程式에 依하여 다음과 같이 주어진다.^{12,13)}

$$\zeta = \frac{\eta\mu}{\epsilon} \quad \text{단, } Kr > 100 \tag{4}$$

$$\mu = \frac{v}{E} \tag{5}$$

$$K = \left(\frac{2nz^2q^2}{\epsilon kT} \right)^{1/2} \quad \text{단, } 1:1 \text{ 電解質} \tag{6}$$

여기서 ζ (zeta)는 그림 2에 表示된 剪斷面에서 電位, η 는 콜로이드半導體 周圍溶液의 粘性度, μ 는 電氣泳動移動度(electrophoretic mobility), ϵ 는 液體의 誘電常數, K는 Debye-Hückel 패러미터, r은 콜로이드半導體의 半徑, v는 인가된 外部電界에 依한 콜로이드

半導體의 漂移速度(migration velocity), E는 인가된 外部電界, n은 溶液의 濃度, z는 이온價, k는 Boltzmann의 常數, T는 絶對溫度를 各各 나타낸다. 電氣泳動現象의 本質은 콜로이드半導體와 電解質 界面의 空間電荷層, 表面準位, 酸化膜, 電氣二重層에 依하여 決定되므로 제타電位는 半導體와 電解質의 界面 現象 解析에 應用할 수 있다.

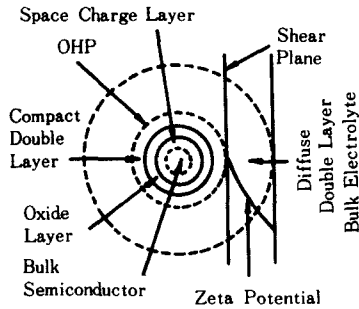


그림 2. 도핑된 콜로이드半導體 周圍의 제타電位와 電氣二重層 概略圖

Fig. 2. A schematic picture of the electrical double layer and zeta potential around the doped colloidal semiconductor.

III. 콜로이드半導體 및 實驗 方法

1. 半導體 試料 및 懸濁液

緩行準位 및 空間電荷效果를 解析하기 위하여 p형 및 n형 실리콘(Si) 粉末과 벤진(C₆H₆), 에타놀(CH₃OH), 에타놀(C₂H₅OH)有機溶媒를 使用하였다. 半導體試料로는 硼素(B)原子(7×10¹⁴/cm³)로 도핑된 p형 Si 웨이퍼와 磷(P)原子(2.4×10¹⁴/cm³)로 도핑된 n형 Si 웨이퍼를 各各 使用하였다. 反面에 多結晶砷化갈리움(GaAs) 界面의 제타電位反轉現象과 特性的으로 吸着된 할로겐이온의 吸着效果를 解析하기 爲하여 電解質로는 NaCl, KCl, KI 溶液을 各各 使用하였다. 모든 半導體웨이퍼는 各各 分離하여 알루미늄(alumina) 亂鉢로 4~5時間 研磨한 後 325網 標準체를 使用하여 試料粉末을 準備하였다. 有機溶媒의 電離, 1:1電解質, 할로겐 이온의 特性的 吸着, 제타電位의 二次 反轉現象¹⁰⁾ 등을 考慮하여 有機溶媒로는 C₆H₆, CH₃OH, C₂H₅OH를, 電解質로는 NaCl, KCl, KI 溶液을 各各 使用하였다.

2. 極小電氣泳動 測定

極小電氣泳動 測定 方法과 實驗에 使用된 實驗 裝備에 關한 內容은 여러文獻에^{10,14,15)} 詳細히 記述되어

있으므로 省略한다. 浮遊된 콜로이드半導體의 크기와 濃度는 各各 0.75~2μm와 ~1.0×10⁻³g/ml 이었다.

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(4.0~27.1V/cm)를 인가하였다. 停狀準位는 Komagata 方程式¹⁶⁾에 依하여 決定하였으며 콜로이드半導體의 漂移速度(電氣泳動移動度)는 Mark II 極小電氣泳動 測定裝置(Rank Bros. Co., England)로 各各의 測定點에서 10番 以上 測定하여 그 平均値를 使用하였다.¹⁷⁾ 제타電位는 式(4)를 利用하여 實驗 및 理論의 으로 計算하여 求하였다.

IV. 實驗結果 및 考察

1. 實驗結果

有機溶媒(CH₃OH, C₂H₅OH)內의 p형 및 n형 Si 半導體 粒子和 KI 溶液內의 도핑되지않은 多結晶 GaAs 粒子的 電氣泳動移動度(제타電位) 極性은 表 1 과 그림 3에 表示된 것 같이 모두 正이었다. 反面에 NaCl 및 KCl 溶液內의 도핑되지않은 多結晶 GaAs 粒子的 電氣泳動移動度(제타電位) 極性은 濃度에 따라 그림 3 과 같이 變하였다. 同一條件下에서(NaCl, KCl) 溶液 및 KI 溶液內의 도핑되지않은 多結晶 GaAs 粒子的 電氣泳動移動度 範圍는 各各 -1.8~1.1×10⁻⁴ cm²/V·sec 와 4.1×10⁻⁵~1.9×10⁻⁴ cm²/V·sec 이었다. 이에 相應하는 제타電位의 範圍는 -23.1~14.1mV 와 5.2~24.8mV 이었다. 여기서 콜로이드半導體 粒子的 誘電常數와 電解質의 粘性度는 位置와 溶液濃度에 相關없는 常數로 假定하였다.

표 1. 有機溶媒內에서 도핑된 Si 粒子的 電氣泳動移動度(제타電位) 極性

Table 1. Signs of electrophoretic mobilities (zeta potential) of the doped Si particles in the organic solvents.

溶 媒	吸着時 電離	電氣泳動移動度(제타電位) 極性	
		p 形 Si	n 形 Si
벤 진	C ₆ H ₆ ⇌ 非電離	中性 (0)	中性 (0)
에타놀	CH ₃ OH ⇌ CH ₃ ⁺ + OH ⁻ 또는	正	正
	CH ₃ OH ⇌ H ⁺ + CH ₃ O ⁻	(+)	(+)
에타놀	C ₂ H ₅ OH ⇌ C ₂ H ₅ ⁺ + OH ⁻ 또는	正	正
	C ₂ H ₅ OH ⇌ H ⁺ + C ₂ H ₅ O ⁻	(+)	(+)

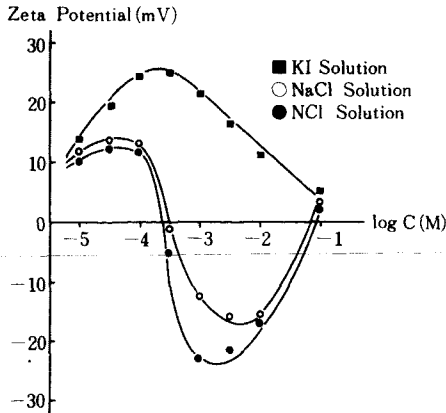


그림 3. 도핑되지 않은 다결晶 GaAs 半導體의 제타電位에 對한 로그 濃度效果

Fig. 3. The effect of log molar concentrations for zeta potentials of the undoped poly-GaAs semiconductor.

2. 結果考察

一連의 實驗은 空氣中에서 7~8時間 동안 遂行하였으므로, 半導體 粒子 表面에는 相當한 酸化膜이 形成되었음을 前提로⁽¹⁸⁾ 다음과 같은 定性的 解析을 하였다.

1) 空間電荷效果

도핑된 Si과 有機溶媒 界面의 特性的 吸着 또는 靜電氣的으로 吸引誘導된 이온效果를 考慮치 않으면 p形 및 n形 Si半導體 粒子의 空間電荷層은 그림 1과 같이 負 및 正으로 各各 帶電되어야 한다. 따라서 p形 및 n形 Si半導體 粒子의 電氣泳動移動度 極性은 서로 反對가 되어야 한다. 그러나 이러한 豫想과는 다르게 有機溶媒 (CH₃OH, C₂H₅OH)에서 도핑된 Si半導體 粒子의 電氣泳動移動도와 제타電位 極性은 모두 正이었다. 反面에 벤진(C₆H₆)內의 도핑된 Si半導體 粒子의 제타電位는 零이었다. 이러한 實驗結果들은 콜로이드半導體 粒子의 空間電荷效果는 表面電荷效果에 比하여 無視 할 수 있음을 보여준다. 또한 벤진같이 電離가 없는 非傳導性 有機溶媒의 경우, 空間電荷效果는 眞性(急行) 表面準位에 依하여 完全하게 遮蔽되며 式(1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Q_{sc} + Q_{ssr} = 0 \text{ 또는 } Q_{sc} = -Q_{ssr} \quad (7)$$

式(7)로부터 이온 吸着이 없는 純粹한 表面 또는 酸化膜을 갖는 半導體의 界面은 電氣的으로 中性임을 推定 할 수 있다. 따라서 界面電荷 觀點에서 볼 때 콜로이드半導體 粒子의 總表面電荷(Q_{ss})는 吸着된 이온(緩行) 表面準位에 依하여 決定되며 실제 半

導體 粒子 表面의 構造의 缺陷, 即 急行準位에 依한 영향은 無視할 수 있다.

2) 表面準位效果

콜로이드半導體를 만들기 爲하여 半導體 웨이퍼를 研磨하면 半導體 粒子 表面에는 結晶格子原子의 週期性 破壞 및 缺陷등에 起因한 懸垂結合(dangling bond)과 이에 따른 眞性(急行) 表面準位가 形成된다. 따라서 콜로이드半導體의 急行準位는 一般的으로 負로 帶電된 缺陥表面準位로 解析할 수 있다. 이러한 急行準位는 半導體 表面과 酸化膜 界面에 位置하며 密度(~10¹¹/cm²)와 弛緩時間(10⁻⁸ - 10⁻³秒)에 依하여 特性지어진다.^(19,20) 또한 急行準位는 酸化膜에 保護되므로 外的要因의 影響을 거의 받지 않는다. 反面에 酸化膜과 電解質 界面에 形成되는 吸着된 이온(緩行) 表面準位の 特性은 外的要因, 即 酸化膜에 吸着된 이온의 種類와 量에 따라 決定된다. 緩行準位の 密度(>10¹³/cm²)와 弛緩時間(數秒-時間)은 酸化膜의 成長에 따라 增加하며 吸着된 이온 또는 分子에 따라 缺陥 또는 도우너表面準位の 特性을 나타낸다. 一般的으로 강한 電氣陰性度로 吸着된 原子 또는 分子는 缺陥特性을 가지므로 負로 帶電된다. 反面에 弱한 電氣陰性度로 吸着된 原子 또는 分子는 도우너 特性을 가지므로 正으로 帶電된다. 그림 4는 Pauling's scale에⁽²¹⁾ 依한 GaAs와 吸着이온(F, Cl,

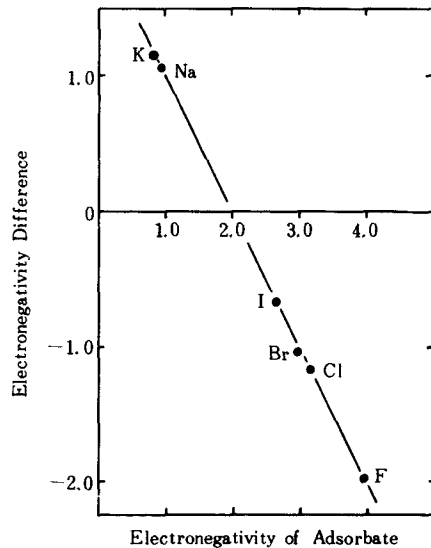
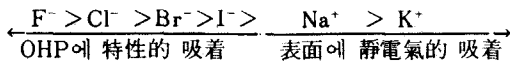


그림 4. GaAs와 吸着物質사이의 電氣陰性度差에 對한 吸着物質의 電氣陰性度 關係

Fig. 4. A relation of electronegativity differences between GaAs and the adsorbates vs. electronegativity of the adsorbates.

Br⁻, I⁻, Na⁺, K⁺) 사이의 電氣陰性度 및 差에 關한 線形關係를 보여주며, 이로부터 다음과 같은 吸着特徵과 順序를 推定할 수 있다.



以上の 解析과 表 1 및 그림 3에 나타낸 實驗結果로부터 제타電位에 미치는 急行準位效果는 緩行準位效果에 比하여 매우 적으므로 無視할 수 있으나 極性이 反對되는 緩行準位를 特性的 및 靜電氣的으로 誘導시키는 트리저링效果는 매우 重要하다. 따라서 表面準位內의 純電荷는 緩行準位에 依하여 主導되며 式(2)는 다음과 같이 近似式으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{ss} \approx Q_{sss} \quad \text{또는} \quad Q_{sss} \approx -Q_{e1} \quad (8)$$

또한 도핑된 Si 및 도핑되지 않은 多結晶GaAs 콜로이드半導體 界面的 緩行準位는 正으로 帶電된 도우너表面準位로서 그림 1에 表示된 Helmholtz 外面(OHP)에 吸着된 陰이온의 電氣化學的 誘導에 寄與한다고 推定할 수 있다.

3) 特性的 吸着이온效果

도핑되지 않은 多結晶GaAs와 電解質(NaCl, KCl 溶液) 界面的 제타電位 反轉現象은 半導體의 表面準位, Helmholtz外面(OHP)에 特性的으로 吸着된 Cl⁻ 이온의 超等價效果로¹²¹ 解析할 수 있다. NaCl溶液內의 제타電位 反轉現象은 KCl 溶液內의 경우와 類似하므로^{10,17} 이에 關한 考察은 省略한다. 反面에 KI溶液內에서는 豫想과는 달리 제타電位 反轉現象이 觀測되지 않았으며 이러한 實驗結果는 極小電氣泳動 測定 및 解析時 지금까지 模糊하였던 剪斷面의 正確한 位置를 推定할 수 있는 重要한 實驗資料이므로 다음 節에서 詳細히 言及하였다.

4) 剪斷面의 位置

密集二重層外面(OHP: outer Helmholtz plane) 部 近으로 推定되는 剪斷面의 位置는 그림 3의 도핑되지 않은 多結晶GaAs와 電解質(NaCl, KCl 溶液) 界面에서 觀測된 二次의 제타電位 極性 反轉現象과 KI 溶液 界面的 제타電位 極性 無反轉現象으로부터 剪斷面은 半導體 酸化膜 表面의 飽和된 Na⁺ 또는 K⁺ 이온에 依하여 OHP로부터 밀리는 現象은 없다고 假定할 수 있다. 換言하면 剪斷面은 그림 5와 같이 OHP에 特性的으로 吸着된 陰이온(Cl⁻, I⁻) 크기에 相關없이 表面으로부터 一定한 거리에 位置한다고 假定할 수 있다. 만일 剪斷面이 表面準位에 飽和된 Na⁺ 또는 K⁺ 이온에 依하여 壓迫되어 OHP로부터 밀려 나간다면 半導體 酸化膜 表面과 剪斷面사이 特性

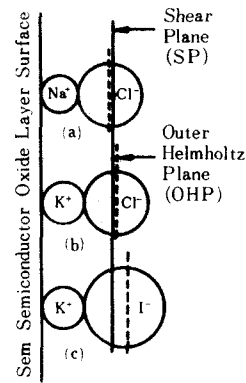


그림 5. 半導體 酸化膜 表面의 Helmholtz 外面(OHP) 剪斷面(SP), 吸着된 이온의 簡素化된 位置 Fig. 5. A simplified position of the adsorbed ions, shear plane(SP), and the outer Helmholtz plane(OHP) on the semiconductor oxide layer surface.

的으로 吸着된 Cl⁻ 이온에 依하여 높은 濃度の 電解質(NaCl, KCl)에서 二次 제타電位 極性 反轉現象은 觀測될 수 없다.¹¹⁰ 또한 KI 溶液內의 제타電位 無反轉現象도 期待할 수 없다. 그 理由는 剪斷面이 固定되어야만 表面電荷는 相對的으로 크기가 큰 I⁻ 이온 때문에 恒常 陽으로 帶電된 K⁺ 이온에 依하여 決定되므로 電氣泳動移動度, 即 제타電位 極性은 正이 되기때문이다. 또한 OHP에 特性的으로 吸着된 外部原子(이온)는 쉽게 조개질 수 없는 基本粒子임을 考慮하면 剪斷面의 概念은 均一하게 切斷된 이온을 包含하는 斷面이 아니라 不均一하게 分布된 原狀의 이온을 包含하는 表面電荷面으로 解析되어야 한다. 特히 KI 溶液의 경우, 從來의 一般的인 理論에 相反되는 結果, 即 剪斷面이 OHP보다 表面에 近接하므로 제타電位가 OHP 電位보다 크다고 推定할 수 있다. 實驗結果로부터, 剪斷面은 表面으로부터 一定한 거리에 位置하며 OHP에 近接 또는 一致한다.

제타電位에 依한 定量的 界面現象 解析은 極小電氣泳動 測定時 發生하는 不可避한 샘플링誤差, 肉眼 測定誤差, 測定裝置의 光原에 依한 界面 光效果, 酸化膜의 形成과 成長등의 相互 復合作用때문에 거의 報告되지 않고 있다.

V. 結 論

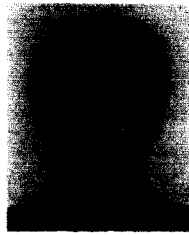
콜로이드半導體 界面的 急行準位 및 空間電荷效果는 緩行準位效果에 比하여 매우 적으므로 無視할 수 있다. 콜로이드半導體의 急行 및 緩行準位는 各各 負

로 帶電된 吸着劑 및 正으로 帶電된 도우너 表面準位이다. 一般적으로 콜로이드半導體 界面의 緩行準位는 物理(靜電氣)的으로 吸着된 陽이온에 依하여 決定되며 正으로 帶電된 도우너表面準位 機能을 한다. 도핑되지 않은 多結晶GaAs와 電解質(NaCl, KCl 溶液) 界面의 Cl^- 이온은 超等價이온이다. 二次의 제타電位反轉現象은 特性的 吸着, 緩行表面準位密度, 電解質濃度, 電氣陰性度差, 이온의 크기 등에 따라 決定된다. 剪斷面의 位置는 이온의 크기, 電解質濃도에 相關없이 表面으로부터 一定한 거리에 位置하며 OHP에 近接 또는 一致한다.

參 考 文 獻

- [1] J.I. Pankove, "Optical processes in semiconductors," Dover, New York, 1975.
- [2] F. Cardon, W.P. Gomes, and W. Dekeyer, Eds., "Photovoltaic and photoelectrochemical solar energy conversion," Plenum, New York, 1981.
- [3] Y.Y. Gurevich and Y.V. Pleskov, in "Semiconductors and semimetals," R.K. Willardson and A.C. Beer, Eds., Academic Press, New York, vol. 19, pp. 255-328, 1981.
- [4] M. Schiavello, Ed., "Photoelectrochemistry, photocatalysis and photoreactors," Reidel, Dordrecht, Holland, 1985.
- [5] Y.V. Pleskov and Y.Y. Gurevich, "Semiconductor photoelectrochemistry," Plenum, New York, 1986.
- [6] M. Gratzel, Ed., "Energy resources through photochemistry and catalysis," Academic Press, New York, 1983.
- [7] B.A. Irving, in "The electrochemistry of semiconductors," P.J. Homles, Ed., Academic Press, London, pp. 256-289, 1962.
- [8] G.B. Larrabee, *J. Electrochem. Soc.*, 108, 1130, 1961.
- [9] J.H. Chun, *J. Colloid Interface Sci.*, 113, 292, 1986.
- [10] J.H. Chun, *J. Electrochem. Soc.*, 134, 3201, 1987.
- [11] J. Leja, "Surface chemistry of froth flotation," Plenum, New York, pp. 433-492, 1982.
- [12] R.J. Hunter, "Zeta potential in colloid science," Academic Press, London, pp. 59-64, 1981.
- [13] P.C. Himenz, "Principles of colloid and surface chemistry," Dekker, New York, pp. 457-463, 1977.
- [14] A.L. Smith, in "Dispersion of powders in liquids," G.D. Parfitt, Ed., 3rd Ed., Applied Sci. Pub., New Jersey, pp. 130-141, 1981.
- [15] R.J. Hunter, "Zeta potential in colloid science," Academic press, London, pp. 150-174, 1981.
- [16] S. Komagata, *Kaimen Denki Kagaku Gaiyo*, Shokodo, Tokyo, p. 63, 1953.
- [17] 千長鎬, "Zeta 電位에 依한 도핑되지 않은 多結晶 Si 및 GaAs 半導體 界面의 表面準位에 關한 定性的 解析," 電子工學會 論文誌, vol. 24, no. 4, 93, 1987.
- [18] A.R. Plummer, in "The electrochemistry of semiconductors," P.J. Homles, Ed., Academic Press, London, pp. 61-140, 1962.
- [19] H.C. Montgomery, *Phys. Rev.* 106, 441, 1957.
- [20] A. Many, in "Advances in semiconductor science," H. Brooks, Ed., Pergamon Press, London, p. 87, 1959.
- [21] R.E. Dickerson, H.B. Gray, and G.P. Haight, Jr., "Chemical principles," 3rd Ed., Benjamin Cummings Pub., Menlo Park, p. 337, 1979.
- [22] J.O'M. Bockris and A.K.N. Reddy, "Modern electrochemistry," Plenum, New York, vol. 2, pp. 748-749, 1970. *

著 者 紹 介



千 長 鎬 (正會員)

1948年 11月 23日生. 1975年 2月
광운대학교 전자공학과 졸업.
1978年 8月 연세대학교 대학원
전자공학과 석사학위 취득. 1980
年 2月 문교부 국비유학시험 합
격. 1984年 5月 미국 Stevens
Inst. of Tech. 대학원 전기및 물리공학과 박사학위
취득. 1988年 9月~1989年 8月 미국 Princeton
대학교 화학과 객원교수. 현재 광운대학교 전자공학
과 부교수. 주관심분야는 반도체 계면현상, 반도체
전기물리, 반도체 광전기화학, 반도체 광전현상, 콜
로이드 반도체 등임.