論文94-31A-5-16

분산된 p형 및 n형 반도체 입자의 도핑 효과와 반도체 동작

(Doping Effects and Semiconductor Behaviors of the Dispersed p- and n-type Semiconductor Particles)

千 長 鎬*, 孫 光 哲**, 羅 克 煥*, 趙 銀 喆***

(Jang Ho Chun, Kwang Chul Son, Keuk Hwan Ra and Eun Chel Cho)

要 約

수성 전해질내에 분산된 p형 및 n형 Si과 GaAs 입자의 도핑 효과와 반도체 동작을 극소전기영동, 전압전류, 정전위전해 기법으로 연구 조사하였다. 공핍층내 공간전하의 부호, 즉 도핑 내용과는 상관없이 p형 및 n형 Si 입자 표면에는 양이온(K^+)이 흡착된다. 표면준위는 음으로 대전된 억셉터 준위이다. 반면에, 공핍층내 공간전하의 부호, 즉 도핑 내용과는 상관없이 p형 및 n형 GaAs 입자 표면에는 음이온(Cl^-)이 흡착된다. 표면준위는 양으로 대전된 도너 준위이다. 동일한 조건하에서 Si 및 GaAs 입자의 도핑 효과와 그에 따른 반도체 동작, 전기영동 이동도, 전기화학적 과정은 도핑 내용, 즉 불순물 종류 및 농도에 상관없이 비슷하다. 분산된 p형 및 n형 반도체 입자의 도핑 효과와 그에 따른 반도체 동작은 입자의 크기가 감소할수록 점차 소멸된다.

Abstract

Doping effects and semiconductor behaviors of the dispersed p- and n-Si, p- and n-GaAs particles in the aqueous electrolyte have been studied using microelectrophoretic, voltammetric and chronoamperometric techniques. The cations (K^+) are adsorbed on both the p- and n- Si particle surfaces regardless of the sign of space charges in the depletion layers, i.e. doping profiles. The surface states are negatively charged acceptor states. On the other hand, the anions (Cl^-) are adsorbed on both the p- and n- GaAs particle surfaces regardless of the sign of space charges in the depletion layers, i.e. doping profiles. The surface states are positively charged donor states. Under the same conditions, electrophoretic mobilities, electrochemical processes, doping effects and related semiconductor behaviors of the Si and the GaAs particles are similar regardless of the doping profiles, i.e. dopants and doping concentrations. The doping effects and related semiconductor behaviors of the dispersed p- and n-type semiconductor particles are gradually lost with decreasing dimensions.

* 正會員, ** 學生會員 光云大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kwangwoon Univ.)
*** 正會員, 三星綜合技術院
(Samsung Advanced Institute of Technology)
接受日字 : 1993年 8月 10日

I. 서 론

전기물리화학 시스템에서 분산된 반도체 입자가 가지는 이점은 구성이 매우 간단하며, 제조 및 사용에 경비가 적게 들며, 반도체 입자-전해질 계면 면적을 크게 할 수 있으며, 광 흡수시 발생된 전자-정공 쌍

의 분리를 재결합 없이 극대화시킬 수 있는 것이다.[1-4] 또한, 많은 반도체 입자(분말)는 중요한 무기안료(색소)로서 사용된다.[5] 그밖에도 매우 작은 반도체 입자에서는 양자역학적으로 해석을 하여야 할 새로운 전기물리화학적 현상도 연구보고 되어왔으며,[6] 최근에는 전해질내에 분산된 고체(금속, 반도체) 입자에 관한 전기화학적 실험과 해석에 관한 연구관심이 국제적으로 높아지고 있는 추세이다.[7] 그럼에도 불구하고, 전기물리화학적 시스템에서 분산된 p형 및 n형 반도체 입자의 전기물리화학적 특성, 즉 반도체 동작, 표면준위(surface states), 입자크기 효과, 도핑 효과, 전기분해 효과, 전기물리화학적 과정등에 관한 연구 보고는 거의 없었다고 판단된다.[8-10] 따라서, 본 논문에서는 p형 및 n형으로 도핑된 Si과 GaAs 입자의 반도체 동작에 관한 일련의 계면 현상을 극소전기영동(microelectrophoretic), 전압전류(voltammetric), 정전위전해(chronoamperometric) 기법으로 연구 조사하였다. 연구 결과는 전기이중층 구조를 가지는 전기화학 전자소자, 전기화학적 반도체 표면처리, 반도체 표면준위 해석, 연료전지 및 광전기화학적 에너지 변환등에 이용되기를 기대한다. 특히, 전극계면에서 반도체 입자에 의한 광 촉매 효과와 계면구조 조작등에 응용이 기대된다.

Ⅱ. 도핑 효과와 반도체 계면구조

반도체와 전해질이 서로 접촉을 하게 되면 접촉 경계면, 즉 계면에는 반도체와 전해질의 전기화학적 위치에너지 차에 의하여 이동 가능한 반도체내의 전하 반송자와 전해질내의 이온 재분포가 평형상태에 도달할 때까지 있게 된다. 따라서, 평형상태일 때 p형 및 n형 반도체와 전해질 계면에는 각각 다음과 같은 계면전하 관계식이 성립된다.[11]

$$(-Q_{SC}) + Q_{SS} + Q_{dl} = 0 \qquad (1a)$$
$$(+Q_{SC}) + Q_{SS} + Q_{dl} = 0 \qquad (1b)$$

여기서, $-Q_{SC}$는 공핍층내의 음으로 대전된 공간전하(억셉터 이온), $+Q_{SC}$는 공핍층내의 양으로 대전된 공간전하(도너 이온), Q_{SS}는 표면준위내의 표면전하, Q_{dl}은 전기이중층내의 흡착된 이온전하를 의미한다. 공핍층내의 공간전하 크기를 무시할 수 있다면 식(1)은 다음과 같이 간단히 쓸수 있다.

$$Q_{SS} + Q_{dl} = 0 \qquad (2)$$

바꾸어 말하면, 표면준위내의 표면전하는 전기이중층내의 흡착 이온전하와 크기는 같으며 부호는 반대이다. 같은 방법으로, 표면준위내의 표면전하 크기를 무시할 수 있다면 식(1)은 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$(-Q_{SC}) + Q_{dl} = 0 \qquad (3a)$$
$$(+Q_{SC}) + Q_{dl} = 0 \qquad (3b)$$

식(3)도 공핍층내의 공간전하는 전기이중층내의 흡착 이온전하와 크기는 같으나 부호는 서로 반대임을 보여준다. 평형상태일 때 p형 또는 n형으로 도핑된 반도체와 전해질 계면구조는 일반적으로 그림 1과 같다. 그림 1에서 Ec는 전도대내의 최저 에너지 준위, E_f는 Fermi 준위, Ev는 가전대내의 최고 에너지 준위, L_S는 공핍층 폭(두께), L_d는 전기이중층 폭(두

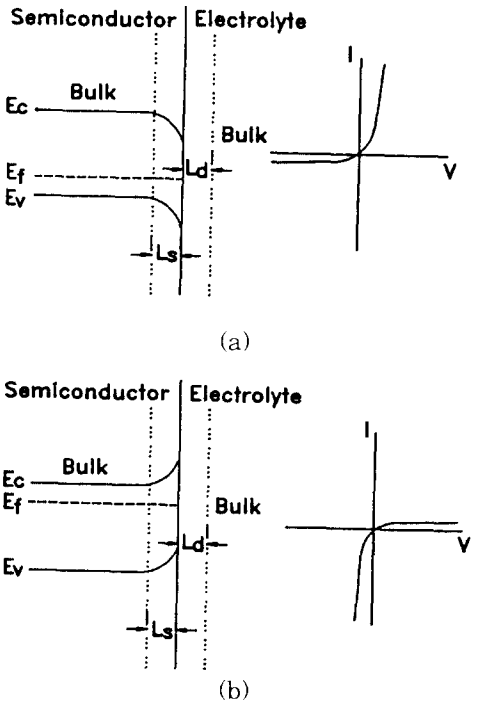


그림 1. 도핑된 반도체-전해질 계면에서 계면구조와 전류-전압 특성. (a) p형 반도체, (b) n형 반도체

Fig. 1. Interfacial structures and current-voltage characteristics at doped semiconductor/electrolyte interfaces. (a) p-type semiconductor, (b) n-

께)을 나타낸다. 표면준위는 그림 1에 도시되지 않았다. p형 및 n형 반도체-전해질 계면구조는 각각 pn 및 np 반도체 접합구조와 유사하므로 도핑된 반도체-전해질 계면에는 정상적으로 그림 1과 같은 정류현상이 나타나게 된다.[12-15] 따라서, 도핑 효과, 즉 도핑된 불순물과 농도에 따라 상반되게 나타나는 계면의 전류-전압 특성 곡선은 반도체 계면구조와 현상을 해석하는 중요한 기준이 될 수 있다.

Ⅲ. 실 험

1. 반도체 시료 및 전해질 준비

전해질내에 분산된 p형 및 n형 기본 반도체 입자를 만들기 위하여 억셉터 불순물(B: 1.8×10^{15}/cm^3)로 도핑된 p-Si 웨이퍼와 도너 불순물(P: 2.3×10^{14}/cm^3)로 도핑된 n-Si 웨이퍼를 각각 사용하였다. 반면에, p형 및 n형 화합물 반도체 입자를 만들기 위하여 억셉터 불순물(Zn: 10^{19}/cm^3)로 도핑된 p-GaAs 웨이퍼와 도너 불순물(Si: $1.5\times10^{18}cm^{-3}$)로 도핑된 n-GaAs 웨이퍼를 각각 사용하였다. 각각의 웨이퍼는 세라믹 유발을 사용하여 4시간 동안 분쇄 및 연마하였다. 연마된 Si 및 GaAs 분말은 각각 500 눈금망 표준체를 통과시켜 전해질내에 분산시켰다. 전해질내에서 반도체 입자의 화학적 분해, 이온의 특이흡착, 고농도 전해질 효과 등을 피하기 위하여 중간농도의 중성 전해질인 10^{-3}M KCl 수성 전해질(pH: 5.62-5.97)을 사용하였다. 준비된 p-Si 분말(0.056g), n-Si 분말(0.056g), p-GaAs 분말(0.145g), n-GaAs 분말(0.145g)은 각각 10^{-3}M KCl 수성 전해질(1000ml)내에 분산시켰다. 반도체 입자를 전해질내에 균일하게 분산시키기 위하여 3300ml 용량의 초음파 세척기(350W, 28KHz) 내에서 20분간 진동시켰다. 종래에 사용한 전기 교반기보다 효과적임을 육안으로도 확인할 수 있었다. 초음파 진동후에는 교반없이 모든 실험에 사용하였다.

2. 실험 측정

전해질내에 분산된 반도체 입자의 전기영동 이동도를 측정하면 반도체 입자 표면, 즉 전기이중층에 흡착된 이온 전하량과 전하 부호를 결정할 수 있다.[16-18] 분산된 p형 및 n형 Si과 GaAs 반도체 입자의 전기영동 이동도(electrophoretic mobility)는 영국 Rank Brothers사의 Mark Ⅱ 전기영동 장치를 사용하여 측정하였다. 반면에, 전해질내에 분산된 Si 및 GaAs 반도체 입자에 관한 전기물리화학적 과정과 산화 및 환원 작용은 Pt 일전극, SCE(Saturated Calomel Electrode) 기준전극, Pt 상대전극을 사용한 표준 3전극 구성을 하여 연구 조사하였다. 일전극으로 사용한 Pt 후막(0.5×15×20mm, 99.9%)은 미국 Johnson Matthey사 제품으로 아세톤 유기용매로 세척하여 사용하였다. 실험은 전압전류 및 정전위전해 기법을 이용하였으며 측정은 미국 EG&G PAR Model 273A 전위계/전류계를 PAR Model 270 소프트웨어 패키지로 조정하여 수행하였다. 반도체 계면에서 가능한 모든 광 효과를[19] 제거하기 위하여 실험 측정은 실온의 암실내에서 수행하였다. 실험 결과는 미국 전류극성 선택방식에 따라 음극 전류를 양(+) 방향으로 정의하여 도시하였다.

Ⅳ. 결과 및 고찰

1. 전기영동 이동도

앞에서 언급하였던 것처럼 p형 및 n형으로 도핑된 반도체 접합 또는 계면에 나타나는 가장 일반적인 전기물리화학적 현상은 상반되는 계면구조와 그에 따른 상반되는 전기영동 이동도 부호와 전기분해 과정이다. 그러나, 이러한 해석 및 예상과는 달리 10^{-3}M KCl 중성 전해질내에 분산된 p-Si과 n-Si 반도체 입자의 평균 전기영동 이동도는 각각 $+1.70\times10^{-4}cm^2/V\cdot s$ 와 $+1.63\times10^{-4}cm^2/V\cdot s$ 이었다. 이러한 실험 측정 결과는 그림 1에 도시된 공핍층내의 공간전하 부호, 즉 도핑 내용과는 상관없이 p-Si 및 n-Si 반도체 입자 표면, 즉 전기이중층에는 거의 같은 양의 양이온(K^+)이 흡착되어 있음을 의미한다. 반면에, 분산된 p-GaAs 와 n-GaAs 반도체 입자의 평균 전기영동 이동도는 각각 $-3.46\times10^{-4}cm^2/V\cdot s$ 와 $-3.54\times10^{-4}cm^2/V\cdot s$ 이었다. 이러한 실험 측정 결과는 GaAs 반도체 입자 표면에는 공핍층내의 공간전하 부호, 즉 도핑 내용과는 상관없이 거의 같은 양의 음이온(Cl^-)이 흡착되어 있음을 의미한다. 따라서, Si과 GaAs 반도체 입자 계면에는 그림 1과 같이 도핑 효과에 의하여 상반되는 전기물리화학적 특성, 즉 p형 및 n형 Si과 GaAs 반도체 입자가 각각 상반되게 갖는 계면구조와 그에 따른 반도체 동작 특성은 거의 소멸 되었음을 추정할 수 있다.

2. 표면준위

반도체 표면에는 격자 원자의 결함, 주기성 파괴등의 원인으로 금핵 표면준위가 형성된다.[20] 특히, 본 실험 과정같이 반도체 입자를 준비하기 위하여 공기중에서 4시간 이상 분쇄 연마 및 500 눈금망 표준체를 통과 시켰으므로 반도체 입자 표면에는 상당한 산

화막과 그에따른 완행 표면준위가 형성되게 된다. Brattain과 Boddy에[21] 의하면 전해질내의 반도체 급행 표면준위 밀도($3\times109/cm^2$)와 이완시간(10^{-8}-10^{-3}초)은 완행 표면준위 밀도($2\times10^{13}/cm^2$)와 이완시간(~분)에 비하여 매우 적으므로 그 영향은 무시할 수 있다. 따라서, 식(2)에 표시된 Q_{SS}는 완행 표면준위내의 표면전하로 해석할 수 있으며 양이온(K^+)이 흡착된 p-Si 및 n-Si 반도체 입자 표면에는 음으로 대전된 억셉터 표면준위가 형성되어 있어야 전기적 중성조건을 만족시키게 된다. 반면에, 음이온(Cl^-)이 흡착된 p-GaAs 및 n-GaAs 반도체 입자 표면에는 양으로 대전된 도너 표면준위가 형성되어야 전기적 중성조건을 만족시키게 된다. 표 1은 도핑된 Si 및 GaAs 반도체 입자의 전기영동 파라미터와 표면준위에 관한 요약을 보여준다.

표　1. 도핑된 Si 및 GaAs 반도체 입자의 전기영동 파라미터와 표면준위에 관한 요약

Table 1. Summary of electrophoretic parameters and surface states of the doped Si and GaAs semiconductor particles.

Particle	Particle Concentration /gl^{-1}	Mean Electrophoretic Mobility/cm^{2}V^{-1}s^{-1}	Double Layer Ion	Surface States
p-Si	5.6×10^{-3}	$+1.70\times10^{-4}$	Cation	Acceptor
n-Si	5.6×10^{-3}	$+1.63\times10^{-4}$	Cation	Acceptor
p-GaAs	1.5×10^{-1}	-3.46×10^{-4}	Anion	Donor
n-GaAs	1.5×10^{-1}	-3.54×10^{-4}	Anion	Donor

3. 전기물리화학적 과정

서로 다른 도핑 내용에 따른 Si 및 GaAs 반도체 입자의 전기분해 과정과 산화 및 환원 작용을 연구조사하기 위하여 순환 전압전류, 미분펄스 전압전류, 정전위전해 기법을 이용하였다. 그림 2-4는 각각 Pt 일전극 계면에 p-Si 및 n-Si 반도체 입자가 분산되어 있을 때의 순환 전압전류도, 미분펄스 전압전류도, 정전위전해 응답 특성을 보여준다. 그림 2-4가 보여주는 공통적인 특성은 분산된 p-Si 및 n-Si 반도체 입자에 의한 전류-전압 특성이 도핑 내용 및 효과에 상관없이 일관성있게 유사한 점이다. 반면에, 그림 5-7은 각각 Pt 일전극 계면에 p형 및 n형 GaAs 반도체 입자가 분산되어 있을 때의 순환 전압전류도, 미분펄스 전압전류도, 정전위전해 응답 특성을 보여준다. 그림 2-4와 똑같이 그림 5-7이 보여주는 공통적인 특성은 분산된 p형 및 n형 GaAs 반도체 입자에 의한 전류-전압 특성이 도핑 내용 및 효과에 상관없이 일관성있게 유사한 점이다. 바꾸어 말하면, Pt 일전극 계면에서 Si 및 GaAs 반도체 입자는 도핑 내용에 상관없이 전기분해 과정과 그에 따른 산화 및 환원 작용이 각각 유사하게 진행된다. Pt 일전극 계면에 분산된 Si 및 GaAs 반도체 입자에 관한 전기분해 과정과 산화 및 환원 작용은 참고문헌에[9,10,22] 상세히 서술되어 있으므로 본 논문에서는 생략한다. 결론적으로 말하면, 그림 2-7은 도핑 내용에 상관없이 Si 및 GaAs 반도체 입자가 가지는 공핍층 구조와 그에 따른 반도체 동작 특성이 소멸되었음을 일관성있게 보여준다. 이러한 전기물리화학적 계면현상은 분산된 반도체 입자의 입자크기 효과로써[23] 다음과 같이 해석할 수 있다. 전해질내에 분산된 반도체 입자의 크기가 공핍층 폭(Ls)에[24] 근접하게 되면 반도체 입자 표면과 벌크 사이의 전위차는 감소하게 된다. 따라서, 그림 1에 도시된 공핍층내의 에너지 밴드는 점점 완만하게 되어 p형과 n형 반도체 사이의 도핑 효과와 반도체 동작 특성은 감소하게 된다. 결국, 분산된 반도체 입자의 크기가 공핍층 폭(Ls)보다 매우 작게 되면 p형과 n형 반도체의 도핑 효과와 반도체 동작 특성은 소멸하게 된다. 따라서, p형과 n형 Si

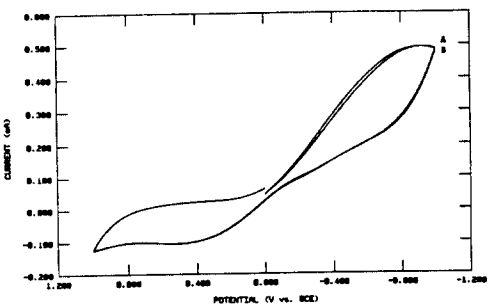
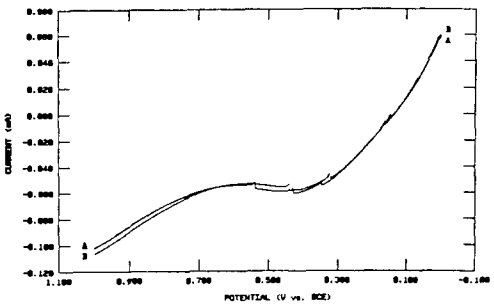


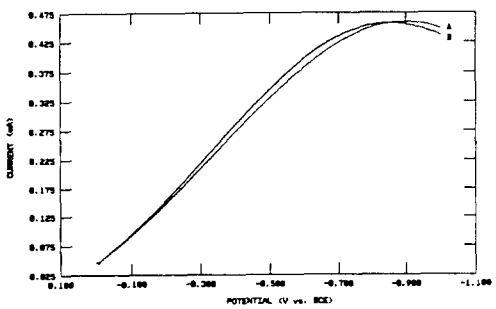
그림 2. Pt 일전극 계면에서 순환 전압전류도. 주사율: 10m V/s, 주사전위: -1.0 to 1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-Si 분말 (B) 10^{-3}M KCl + n-Si 분말

Fig. 2. Cyclic voltammograms at the Pt working electrode interface. Scan rate: 10 mV/s, scan potential: -1.0 to 1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-Si powder (B) 10^{-3}M KCl + n-Si powder.

및 GaAs 반도체 입자 사이의 미소한 전기영동 이동도 차는 도핑 내용 보다는 반도체 입자 준비 및 측정 과정에 기인한다고 해석하는 것이 보다 합리적이다. 같은 방법으로, 그림 2-7에서 보여주는 p형과 n형 Si 및 GaAs 반도체 입자 사이의 미소한 양음극전류 차이도 도핑 내용보다는 반도체 입자 준비 및 측정 과정에 기인한다고 해석할 수 있다. 이러한 관점에서 보면, 분산된 반도체 입자를 필요로하는 전기물리화학적 시스템에서는 순수한 또는 도핑된 결정 반도체 보다 제조 및 사용이 간단하고 가격이 저렴한 도핑되지 않은 다중결정 또는 비정질 반도체를 사용하는 것이 보다 간편하며 경제적이다.



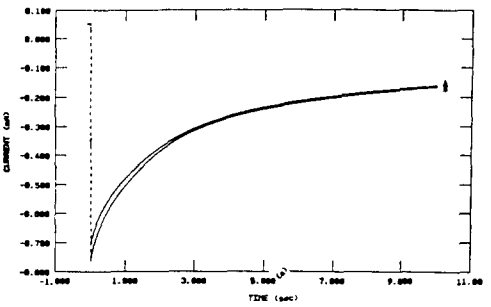
(a)



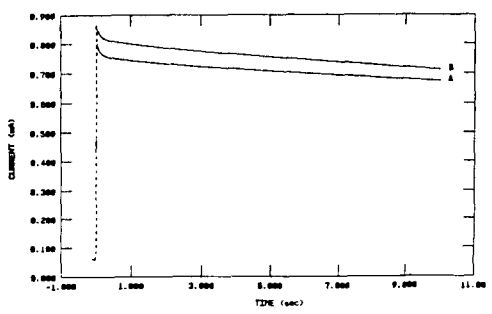
(b)

그림 3. Pt 일전극 계면에서 미분펄스 전압전류도. 주사율: 10 mV/s, 펄스높이: 25 mV, 펄스폭: 50 ms, (a) 주사전위: 0 to 1.0 V vs. SCE, (b) 주사전위: 0 to -1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-Si 분말 (B) 10^{-3}M KCl + n-Si 분말

Fig. 3. Differential pulse voltammograms at the Pt working electrode interface. Scan rate: 10 mV/s, pulse height: 25 mV, pulse width: 50 ms, (a) scan potential: 0 to 1.0 V vs. SCE, (b) scan potential: 0 to -1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-Si powder (B) 10^{-3}M KCl + n-Si powder.



(a)



(b)

그림 4. Pt 일전극 계면에서 정전위전해 응답 시간 계단: 10 s, (a) 전위계단: 0 to 1.0 V vs. SCE, (b) 전위계단: 0 to -1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-Si 분말 (B) 10^{-3}M KCl + n-Si 분말

Fig. 4. Chronoamperometric responses at the Pt working electrode interface. Time step: 10 s. (a) potential step: 0 to 1.0 V vs. SCE, (b) potential step: 0 to -1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-Si powder (B) 10^{-3}M KCl + n-Si powder.

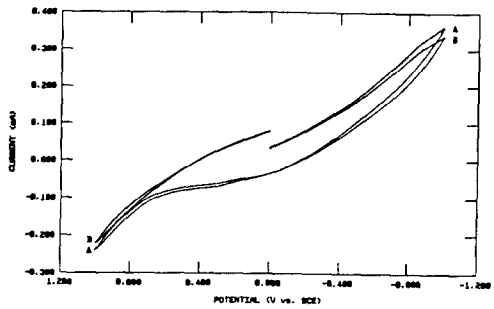
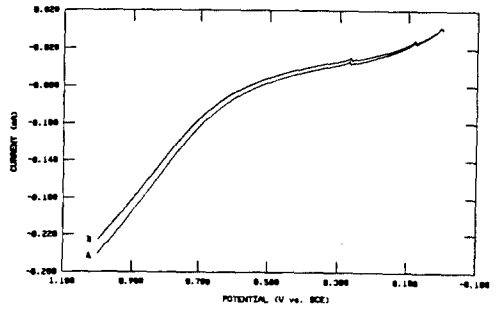
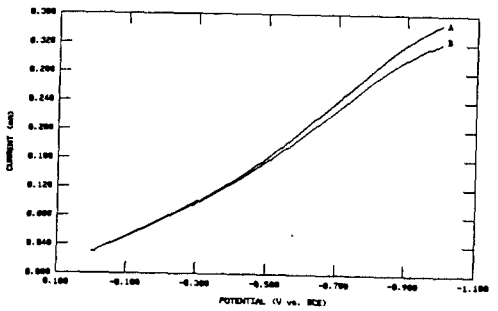


그림 5. Pt 일전극 계면에서 순환 전압전류도. 주사율: 10 mV/s, 주사전위: -1.0 to 1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-GaAs 분말 (B) 10^{-3}M KCl + n-GaAs 분말

Fig. 5. Cyclic voltammograms at the Pt working electrode interface. Scan rate: 10 mV/s, scan potential: -1.0 to 1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-GaAs powder (B) 10^{-3}M KCl + n-GaAs powder.



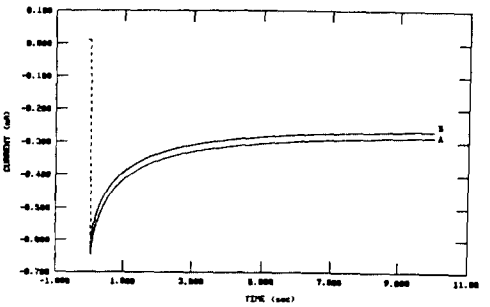
(a)



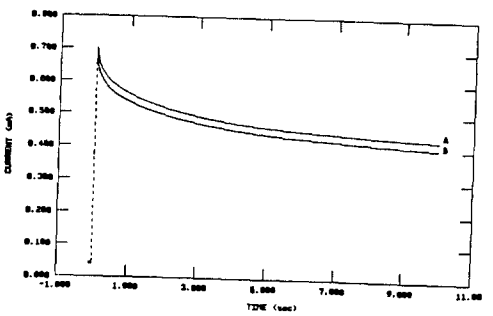
(b)

그림 6. Pt 일전극 계면에서 미분펄스 전압전류도. 주사율: 10 mV/s, 펄스높이: 25 mV, 펄스폭: 50 ms, (a) 주사전위: 0 to 1.0 V vs. SCE, (b) 주사전위: 0 to -1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-GaAs 분말 (B) 10^{-3}M KCl + n-GaAs 분말

Fig. 6. Differential pulse voltammograms at the Pt working electrode interface. Scan rate: 10 mV/s, pulse height: 25 mV, pulse width: 50 ms, (a) scan potential: 0 to 1.0 V vs. SCE, (b) scan potential: 0 to -1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-GaAs powder (C) 10^{-3}M KCl + n-GaAs powder.



(a)



(b)

그림 7. Pt 일전극 계면에서 정전위전해 응답. 시간계단: 10 s, (a) 전위계단: 0 to 1.0 V vs. SCE, (b) 전위계단: 0 to -1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-GaAs 분말 (B) 10^{-3}M KCl + n-GaAs 분말

Fig. 7. Chronoamperometric responses at the Pt working electrode interface. Time step: 10 s, (a) potential step: 0 to 1.0 V vs. SCE, (b) potential step: 0 to -1.0 V vs. SCE. (A) 10^{-3}M KCl + p-GaAs powder (C) 10^{-3}M KCl + n-GaAs powder.

V. 결 론

도핑 내용에 상관없이 p형 및 n형 Si 반도체 입자 표면에는 양이온(K^+)이 흡착된다. Si 반도체 입자의 표면준위는 음으로 대전된 억셉터 준위이다. 도핑 내용에 상관없이 p형 및 n형 GaAs 반도체 입자 표면에는 음이온(Cl^-)이 흡착된다. GaAs 반도체 입자의 표면준위는 양으로 대전된 도너 준위이다. 주어진 전위범위(-1.0 to 1.0 V vs. SCE)에서 도핑 내용에 상관없이 Si과 GaAs 반도체 입자의 전기영동 이동도 및 전기물리화학적 과정은 각각 유사하다. 도핑 효과에 의한 Si과 GaAs 입자의 반도체 동작 특성은 입자크기의 감소에 따라 점차 소멸된다. 극소전기영동 및 전기화학적 기법은 반도체 입자 표면준위, 계면구조 및 전하, 도핑 효과, 반도체 동작 해석등에 유용한 방법이 될 수 있다.

감사의 글

EG&G PAR 273A 전기화학 시스템을 구입할 수 있게 재정 지원을 하여 주신 광운대학교 조무성 전총장님께 감사를 드립니다. 또한, 웨이퍼를 준비하여 주신 이영길 부장님(삼성전자, New Media사업부)과 김준영 책임연구원님(삼성종합기술원, 신소재연구실)께 감사를 드립니다.

參 考 文 獻

[1] M. Gratzel, in "Photoelectrochemistry, Photocatalysis and Photoreactors", M. Schiavellio, Editor, p.217-238, Reidel, Dordrecht, 1985.

[2] Y. V. Pleskov and Y. Y. Gurevich, Semiconductor Photoelectrochemistry, p.290-293, Plenum, 1986.

[3] R. Memming, in "Topics in Current Chemistry", E. Steckhan, Editor, vol. 143, Electrochemistry II, p.79-112, Springer-Verlag, Berlin, 1988.

[4] J. F. Reber, ibid., M. Schiavellio, Editor, p.321-349, 1985.

[5] L. K. Schmidt, Chem. Ind., 34, 452, 1982.

[6] A. Henglein, ibid., E. Steckhan, Editor, p.113-180, 1988.

[7] R. A. Mackay and J. Texter, Ed., "Electrochemistry in Colloids and Dispersions", VCH, New York, 1992.

[8] J. H. Chun, "The Effect of Adsorption of Ions at the Silicon-KCl Solution Interface", J. Colloid Interface Sci., vol.113, pp.292-293, 1986.

[9] J. H. Chun and K. H. Ra, "Effect of the Anodic Decomposition of GaAs Particles at the Pt Electrode Interface", J. Electrochem. Soc., vol.140, no.9, pp. 2568-2571, 1993.

[10] 천장호, 손광철, 나극환, 조은철, "Pt전극 계면의 전기물리적 현상에 관한 GaAs반도체 입자효과", 전자공학회 논문지, 31권 A편, pp. 169-176, 1994.

[11] J. H. Chun, "Qualitative Analysis of Interfacial Phenomena at the Undoped Poly-GaAs/KCl Solution Interface Using Microelectrophoresis Measurments", J. Electrochem. Soc., vol.134, pp.3201-3204, 1987.

[12] 천장호, 전자공학회 논문지, "Doping 된 - 족 화합물 반도체 계면에서 공간전하효과", 27권, pp.256-260, 1990.

[13] 천장호, 전자공학회 논문지, "Doping된 Si반도체의 계면구조와 활성화 과정", 27권, pp. 1042-1048, 1990.

[14] 천장호, 조은철, 나극환, "p-GaAs 반도체 계면에서 정공주입효과와 수소 Gas발생에 관한 연구", 전자공학회 논문지, 28권 A편, pp. 465-471, 1991.

[15] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed., p.84-89, Wiley, New York, 1981.

[16] R. J. Hunter, Zeta Potential in Colloid Science, Academic Press, London, 1981.

[17] S. R. Morrison, Electrochemistry at Semiconductor and Oxidized Metal Electrodes, Plenum, New York, 1980.

[18] A. Kitahara and A. Watanabe, Electrical Phenomena at Interfaces, Dekker, New York, 1984.

[19] J. I. Pankove, Optical Processes in Semiconductors, Dover, New York, 1975.

[20] A. R. Plummer, in "The Electrochemistry of Semiconductors", P. J. Holmes, Editor, p.72-77, Academic Press, London, 1962.
[21] W. H. Brattain and P. J. Boddy, "The Interface between Germanium and a Purified Neutral Electrolyte", J. Electrochem. Soc., vol.109, pp. 574-582, 1962.
[22] H. Gerischer, in "Photovoltaic and Photoelectrochemical Solar Energy Conversion," F.Cardon et al., Editors, p.239-245, Plenum, 1981.
[23] T. Wolkenstein, Electronic Processes on Semiconductor Surfaces during Chemisorption, p.283-289, Consultants Bureau, New York, 1991.
[24] S. R. Morrison, ibid., p.68-69, Plenum, New York, 1980.

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 30卷 A編 第 11號 參照
현재 광운대학교 전자공학과 교수

孫光哲(學生會員) 第 31卷 A編 第 2號 參照
현재 광운대학교 박사과정 재학중.

趙銀喆(正會員) 第 31卷 A編 第 2號 參照
현재 삼성종합기술원 신소재응용연구소 에너지환경연구실.