

SrO·6Fe₂O₃ 電子 Ceramics 界面에서 循環電壓圖 解析(Analysis on Cyclic Voltammograms at SrO·6Fe₂O₃
Electronic Ceramics Interfaces)

千 長 鎬*, 趙 銀 喆**, 羅 克 煥*

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

要 約

SrO·6Fe₂O₃ 電子세라믹스 界面에서 전류-전압 특성을 循環電壓 방법을 사용하여 연구조사하였다. 동일한 陽極 및 陰極過程을 보여주는 대칭적이며 안정된 循環 電壓圖를 實驗과정에서 얻었다. 水性電解質내에서 近似 飽和電流値는 約 50 μ A 이었으나 電極試片의 實驗과정에 따라 변한다. 물은 水性電解質 또는 蒸溜水내에서 SrO·6Fe₂O₃ 電子세라믹스의 전류-전압 특성은 물의 吸着過程과 相互連結된 多孔性 효과에 의하여 결정된다. 반면에, 비교적 濃한 水性電解質內에서 전류-전압 특성은 이온 吸着과정과 그에 따른 전기 이중층에 의하여 결정된다. SrO·6Fe₂O₃ 電子 세라믹스는 전기화학적으로 안정된 抵抗, 電極 또는 濕氣 感知素子로 직접 사용될 수 있다.

Abstract

The current-voltage characteristics at SrO·6Fe₂O₃ electronic ceramics interfaces have been studied using cyclic voltammetric methods. The symmetrical and stable cyclic voltammograms, which indicate the same anodic and cathodic process, are obtained on the whole experiments. The approximate saturation current is 50 μ A but the value depends on the experimental processes of the electrode specimens. The current-voltage characteristics of SrO·6Fe₂O₃ electronic ceramics in dilute aqueous electrolytes or double deionized water are determined by the water adsorption process and the interconnected porosity effect. On the other hand, the current-voltage characteristics in relatively concentrate aqueous electrolytes are determined by the ionic adsorption process and the related electrical double layers. The SrO·6Fe₂O₃ electronic ceramics can be directly used as an electrochemically stabled resistor, electrode or a humidity sensor.

I. 序 論

고정관념으로부터 탈피한 새로운 思考로부터 과거에는

절연체 또는 불량도체 정도로 생각되었던 無機물질과 非金屬 酸化物半導體 및 電子세라믹스와 같은 新素材가 합성되어 有用하게 되었다. 또한 일반적으로 금속의 電氣傳導度가 半導體나 電子세라믹스보다 매우 높다는 고정관념으로부터 탈피할 수 있었을 때 비로소 Ba-La-Cu-O系 高溫 超傳導 電子세라믹스가 합성될 수 있었다.^[1] 높은 전기저항성을 갖는 素材 특성때문에 반도체 소자보다 늦

*正會員, **學生會員, 光云大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Kwangwoon Univ.)
接受日字: 1991年 11月 20日

게 전자소자에 응용되기 시작한 電子세라믹스는 磁性세라믹스, 誘電性세라믹스, 光電세라믹스, 壓電세라믹스, 熱電세라믹스, 그리고 遷移溫度가 120K를 넘는 Tl-Ba-Ca-Cu-O系 고온 초전도 세라믹스로 그 응용범위를 넓혀가고 있다.^{12,3)} 지금까지 대부분의 電子素子 소재로는 半導體가 주류를 이루어 왔으며 그 형태도 半導體-半導體 pn접합이 대부분이었다. 그러나, 이제는 半導體 소재를 代替하여 과거보다 더 연구관심을 기울여야 할 電子素材 분야는 電子세라믹스라고 생각되며 電子素子의 형태도 금속 또는 半導體-電解質 접합과^{4,5)} 유사한 電子세라믹스-電解質 접합과 같은 전기화학적 소자의 연구 개발과 활성화가 기대된다. 특히 半導體와는 달리 電子세라믹스는 熱處理 製造工程上 불가피하게 갖게 되는 多孔性(porosity) 및 grain에 의한 多重結晶體 구조, 다양한 元素構成과 組成比 등을 변화시킬 수 있으며, 물(H₂O)을 溶媒로 하는 모든 水性 電解質 계면에서 전기물리 및 화학적 특성에 관한 연구는 물리전자공학, 표면물리 화학, 전기화학, 재료과학 분야와 같은 학제간 기초연구와 응용과제로서 의의가 있다고 사료된다.

SrO·6Fe₂O₃ 電子세라믹스는 MO·6Fe₂O₃(여기서 M은 Sr, Ba과 같은 2가 원소를 의미)系로서 주로 永久磁石의 소재로만 사용되어 전기물성에 관한 연구보고는 많았으나, 전해질 접합 또는 전기화학적 소자의 응용개발에 有用될 계면현상에 관한 연구보고는 거의 없었다고 판단된다.¹⁶⁾ 따라서, 본 실험연구에서는 계면구조와 그에 따른 전류-전압 특성곡선을 가장 정확하게 추적조사할 수 있는 循環電壓 측정 방법¹⁷⁾ 사용하여 循環電壓圖(cyclic voltammogram)를 작성한 후 시간에 따른 전극전류 변화, 계면구조, 물이온(H₃O⁺ 또는 OH⁻)의 흡착과정에 따른 전극전류 증가 및 포화현상과 다공성 효과,¹⁸⁾ 이온농도 효과, 濕氣 감지소자 응용 가능성 등에 관한 정성적 해석을 한다.

II. 電子세라믹스의 多孔性 效果

電子세라믹스는 제조공정상 불가피한 燒結과 高溫壓縮의 열처리 과정을 거치게 되므로 grain 구조의 다중결정체와 氣孔(pore)들이 복잡하게 연결된 다공성 구조를 갖게 된다. 전형적인 氣孔들의 직경은 50-300nm 정도이며 grain 구조의 다중결정체들의 직경은 약 1μm이다.

일반적으로 물分子는 상온에서 다음과 같이 陽 및 陰이온으로 解離되어 電極 表面에 흡착된다.^{18,9)}



따라서, 다공성 다중결정 구조를 갖는 SrO·6Fe₂O₃

電子세라믹스가 물(H₂O) 또는 물을 용매로 한 수성전해질과 접촉하게 되면 그 표면에 노출되어 있는 기공내에는 H₃O⁺ 또는 OH⁻ 이온들의 흡착이 시작되어 이온농도가 증가한다. 환안하면, SrO·6Fe₂O₃ 電子세라믹스 표면에서는 이온농도 증가에 따른 저항성 감소현상이 나타나는 이른바 다공성 효과가 있게 된다. 이러한 저항성 감소현상, 즉 전기전도도 증가현상은 표면에 노출된 氣孔內에 해리된 H₃O⁺ 또는 OH⁻ 이온들이 포화될 때까지 계속된다. 따라서, 電解槽내에 標準三電極 구성과 같은 전기화학적 閉回路가 구성되면 전기전도도 증가와 포화에 상응하는 계면통과 전류의 증가 및 포화특성이 나타난다. 물론, 低濃度의 수성전해질에서는 유사한 전류-전압 특성을 기대할 수 있으나 高濃度의 수성전해질에서는 전기이중층과 비전도도의 영향이 커지게 되므로 이러한 계면현상은 기대하기 어렵다. 다공성 효과는 표면분해 또는 전기촉매 작용을 하는 대부분의 금속은 물론, 백금족을 포함하는 귀금속 표면에서도 관측할 수 없는 계면현상이다.

III. 實驗內容 및 方法

실험에 사용된 SrO·6Fe₂O₃ 電子세라믹스 試片 (grain크기: 1μm, 氣孔크기:<300nm)은 日本 住友金屬 제품으로 육방형 magnetoplumbite(PbFe₁₂O₁₉) 구조와 매우 유사하며 磁化時 높은 抗磁力 특성을 나타내는 永久磁石 素材로서 잘 알려져 있다.^{110,11)} SrO·6Fe₂O₃ 시편의 자화시 자화특성을 磁氣 히스테리시스 環狀曲線으로 나타낼 수 있듯이 SrO·6Fe₂O₃ 시편 계면의 전기물리화학적 특성은 전류-전압 특성 환상곡선, 즉 순환전압도로써 나타낼 수 있다. 계면의 전기물리적 특성을 연구조사하기 위하여 준비한 증류수(H₂O)를 용매로 한 中性, 鹽基性, 酸性전해질의 pH 및 比傳導도는 表1과 같다. pH와 비전도도 측정은 각각 東佑 의료 시스템의 DP-135 pH 측정기와 미국 Cole Parmer사 1481-00 溶液傳導度 측정기를 사용하였다.

모든 실험은 Pyrex 전해조내에 그림 1(a)에 도시된 표준 3-전극을 구성하여 常溫에서 수행하였다. 일電極(WE)으로 SrO·6Fe₂O₃ 시편, 基準電極(RE)으로 SCE (Saturated Calomel Electrode), 相對電極(CE)으로 백금(Pt)을 각각 사용하였다. 일전극에 인가되는 전압은 미국 PINE사 RDE4 線形電位計를 순환적(0→1.0→0→-1.0→0V vs. SCE)으로 調整하였다. 陽 및 陰電位에 따른 SrO·6Fe₂O₃ 시편(전극)의 전류특성을 비교 연구조사하기 위하여 인가된 電壓變化率(스캔率)은 100mV/s로 고정하였다. 측정되는 전류-전압 특성 환상곡선, 즉 循環電壓圖는 미국 Houston사 2000 X-Y 기록계를 사용하여 圖示하였다. SrO·6Fe₂O₃ 試片은 각각의

실험이 끝날때마다 증류수로 洗滌한 후 電氣爐에서 약 20시간 건조시켰다.

IV. 結果 및 考察

SrO · 6Fe₂O₃ 電子세라믹스와 水性電解質 같이 서로 다른 相이 접촉하게 되면 접촉경계면, 즉 계면에서는 電氣化學的 位置에너지差에 따른 자유전하와 이온의 표리 및 확산운동이 평형상태에 이를때까지 계속된다. 따라서 계면에는 이온의 흡착 및 확산분포에 의한 전기이중층이 형성되며 그에 따른 전위분포가 나타나게 된다. 이러한 전기이중층은 電氣等價的으로 저항성분과 용량성분으로써 표시된다. 따라서 선형순환전압을 일전극에 인가시킬 때 나타나는 전류변화의 軌跡, 즉 순환전압도는 바로 전극계면에 형성된 전기이중층 구조와 화학적 반응에 상응함을 의미한다.

그림 1은 중성 전해질인 10⁻²M KCl과 염기성 전해질인 10⁻²M KOH에서 SrO · 6Fe₂O₃ 전극의 循環電壓圖는 모두 原點(0V, 0A)을 중심으로 거의 대칭적임을 보여준다. 환원하면, 陽電位(0-1.0V vs. SCE)일때 전극 표면에 정전기적으로 유도되는 음이온(Cl⁻² 또는 OH⁻²)에 의한 전기이중층 구조변화 및 화학적 반응은 陰電位(-1.0-0V vs. SCE)일때 전극표면에 정전기적으로 유도되는 양이온(K⁺)에 의한 전기이중층 구조변화 및 화학적 반응에 거의 평형적임을 의미한다. 일반적으로 전극 표면에서 화학적 반응이 없는 KCl 중성 전해질과 강한 화학적 반응을 하는 KOH 염기성 전해질에서 순환전압도가 유사함은 SrO · 6Fe₂O₃ 전극이 표면분해 또는 불의 전기분해 작용이 없는 전기화학적으로 매우 안정된 전극임을 의미한다. 또한 線形에 가까운 순환전압도는 계면에 형성되어 있는 전기이중층의 전기등가적 성분은 용량성보다는 저항성에 의하여 결정되고 있음을 의미한다. 만일 理想的인 저항 성분만 있다고 가정하면 순환전압도의 모양은 직선으로 나타나게 된다.

그림 2는 그림 1에 圖示된 순환전압도에서 最大 陽極電流(1.0V vs. SCE 일때)와 最大 陰極電流(-1.0V vs. SCE 일때) 변화를 스캔시간(실험시간)에 따라 나타낸 것이다. 그림 2로부터 최대 양극전류의 크기는 최대 음극전류의 크기와 같으며 스캔시간에 따른 변화가 없이 일정함을 알 수 있다. 즉 양극과정과 음극과정은 중성 또는 염기성 전해질에 상관없이 거의 평형상태임을 보여준다.

그림 3은 SrO · 6Fe₂O₃ 전극표면에서 중성 전해질의 이온(Cs⁺, NO₃⁻)과 물이온(H₃O⁺, OH⁻) 효과를 비교하기 위하여 10⁻⁵M CsNO₃ 중성 전해질과 증류수(H₂O)를 사용하였을 때의 전형적인 循環電壓圖를 보여 준다.

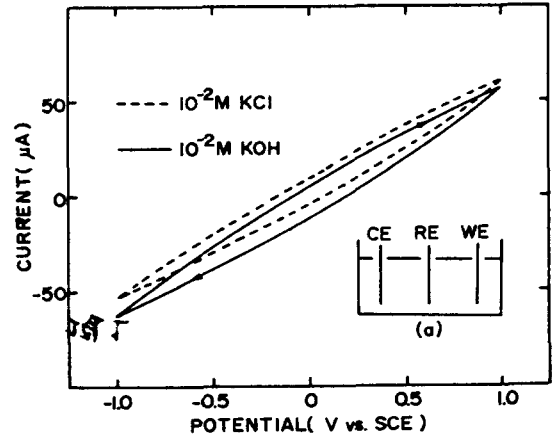


그림 1. SrO · 6Fe₂O₃ 電子세라믹스 / (10⁻²M KCl, 10⁻²M KOH) 水性電解質 界面에서 典型的인 循環電壓圖(스캔 전위 : -1.0 -1.0V vs. SCE, 스캔율 : 100mV/s, 스캔시간 : 60분, 표면적 : 8.1cm²)

Fig. 1. The typical cyclic voltammograms at SrO · 6Fe₂O₃ electronic ceramics / (10⁻²M KCl, 10⁻²M KOH) aqueous electrolyte interfaces(scan potential : -1.0 -1.0V vs. SCE, scan rate : 100mV/s, scanning time : 60 minutes, surface area : 8.1cm²).

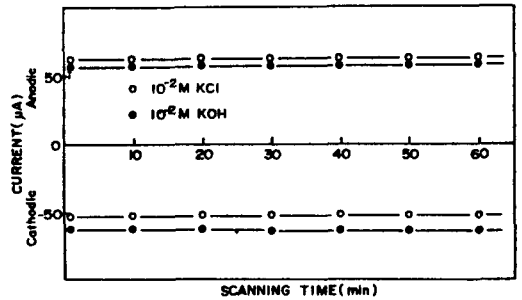


그림 2. SrO · 6Fe₂O₃ 電子세라믹스 / (10⁻²M KCl, 10⁻²M KOH) 水性電解質 界面에서 陽 및 陰極電流變化(스캔 전위 : -1.0V -1.0V vs. SCE, 스캔율 : 100mV/s, 양극전류 측정 : 1.0V vs. SCE, 음극전류 측정 : -1.0V vs. SCE, 스캔시간 : 60분, 표면적 : 8.1cm²)

Fig. 2. The variations of anodic and cathodic currents at SrO · 6Fe₂O₃ electronic ceramics / (10⁻²M KCl, 10⁻²M KOH) aqueous electrolyte interfaces(scan potential : -1.0 -1.0V vs. SCE, scan rate : 100mV/s, anodic current measuring : 1.0V vs. SCE, cathodic current measuring : -1.0 vs. SCE, scanning time : 60 minutes, surface area : 8.1cm²).

循環電壓圖에 나타난 전류-전압 특성은 그림 1의 경우와 비슷하였다. 따라서, 低濃度인 10⁻⁵M CsNO₃ 중성 전해질과 증류수 계면에서도 高濃度의 10⁻²M KCl 중성 전해질과 10⁻²M KOH 염기성 전해질 계면에서와 같은 정성적 해석을 할 수 있다.

그러나 스캔시간에 따른 최대 양극전류 및 최대 음극전류의 변화는 그림 2와는 대조적으로 그림 4와 같이 초기(0-90분)에는 비교적 크게 증가하다가 스캔시간이 증가함에 따라 포화전류치에 이르는 전형적인 전자세라믹스의 다공성 효과와 그에 따른 전류변화 현상을 보여준다. 表1에 제시된 10⁻⁵M CsNO₃ 중성 전해질의 비전도도(4.1×10⁻⁶mho/cm)가 증류수의 비전도도(1.17×10⁻⁶mho/cm)보다 더 큼에도 불구하고 시간에 따른 최대 양극 및 음극전류의 크기와 변화율은 반대로 증류수에서 보다 크게 나타나는 현상은 다음과 같이 해석할 수 있다. 매우 낮은 이온농도의 전해질에서 SrO·6Fe₂O₃ 전극표면에 노출되어 있는 수 많은 기공에서 이루어지는 흡착과정은 중성 전해질 이온(Cs⁺, NO₃⁻)보다는 물이온(H₃O⁺, OH⁻)에 의하여 결정된다. 환언하면, 물이온의 기공흡착은 非靜電氣의 吸着, 즉 特異吸着(specific adsorption)이라고 해석할 수 있다. 물론 전해질의 이온농

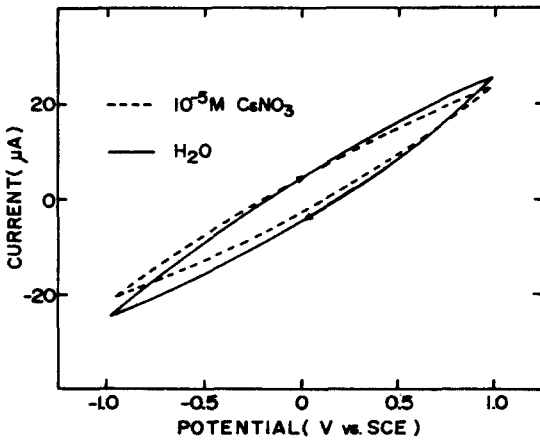


그림 3. SrO·6Fe₂O₃ 電子세라믹스 / (10⁻⁵M CsNO₃, H₂O) 水性電解質 界面에서 典型的인 循環電壓圖 (스캔 전위 : -1.0 -1.0V vs. SCE, 스캔율 : 100mV/s, 스캔시간 : 60분, 표면적 : 8.1cm²)

Fig. 3. The typical cyclic voltammograms at SrO·6Fe₂O₃ electronic ceramics / (10⁻⁵M CsNO₃, H₂O) electrolyte interfaces (scan potential : -1.0 -1.0V vs. SCE, scan rate : 100mV/s, scanning time : 60 minutes, surface area : 8.1cm²).

도가 높아지면 계면현상은 수성 전해질내의 溶質농도, 즉 이온흡착과 확산분포에 의한 전기이중층 형성과 비전도도에 의하여 주도되므로 물이온에 의한 다공성 효과와 그에 따른 전극전류 증가 및 포화현상은 그림 2와 같이 나타나지 않는다.

그림 5는 10⁻¹M H₂SO₄ 산성 전해질의 순환전압도로서 10⁻²M KCl 중성 전해질과 10⁻²M KOH 염기성 전해질의 순환전압도보다 더 안정된 선형 및 대칭적인 전류-전압 특성을 보여 준다. 환언하면, SrO·6Fe₂O₃ 전극계면에서 H⁺ 또는 SO₄⁻² 이온에 의하여 형성된 전기이중층의 전기등가적 성분은 보다 더 저함 성분에 의하여 결정됨을 의미한다. 일반적으로 금속과 반도체 계면에서는 그림 1, 3, 5와 같은 안정된 선형적이며 대칭적인 순환전압도를 얻을 수 없다.

그 이유는 백금(Pt)과 Palladium(Pd) 같이 안정된 금속은 수성 전해질내에서 물을 전기분해하는 전기촉매

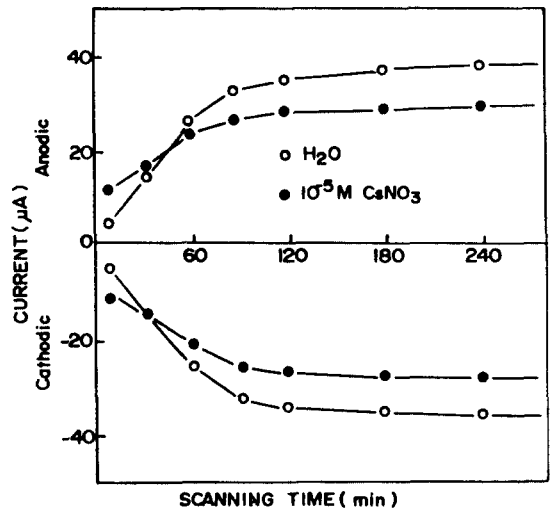


그림 4. SrO·6Fe₂O₃ 電子세라믹스 / (10⁻⁵M CsNO₃, H₂O) 水性電解質 界面에서 陽 및 陰極 電流 變化 (스캔전위 : -1.0V -1.0V vs. SCE, 스캔율 : 100mV/s, 양극전류 측정 : 1.0V vs. SCE, 음극전류 측정 : -1.0V vs. SCE, 스캔시간 : 60분, 표면적 : 8.1cm²)

Fig. 4. The variations of anodic and cathodic currents at SrO·6Fe₂O₃ electronic ceramics / (10⁻⁵M CsNO₃, H₂O) aqueous electrolyte interfaces (scan potential : -1.0 -1.0V vs. SCE, scan rate : 100mV/s, anodic current measuring : 1.0V vs. SCE, cathodic current measuring : -1.0V vs. SCE, scanning time : 60 minutes, surface area : 8.1cm²).

표 1. 준비된 水性電解質의 pH 및 比傳導度

Table 1. pH and specific conductances of the prep-ared aqueous electrolytes.

parameter 水性電解質	pH	比傳導度[mho/cm]
H ₂ O	6.2	1.17×10 ⁻⁶
10 ⁻⁵ M CsNO ₃	6.1	4.1×10 ⁻⁶
10 ⁻² M KCl	6.2	1.40×10 ⁻³
10 ⁻² M KOH	11.4	1.61×10 ⁻³
10 ⁻⁴ M H ₂ SO ₄	3.6	1.41×10 ⁻⁴
10 ⁻¹ M H ₂ SO ₄	0.9	8.41×10 ⁻²

작용으로 그림 6과 같은 비선형 전류-전압 특성을 나타낸다. 반면에, 반도체의 경우는 수성 전해질내에서 반드시 pn접합구조를 갖게 되므로 그림 7과 같은 整流特性이 나타난다. 따라서, 그림 1, 3, 5와 같은 선형적이며 대칭적인 순환전압도는 얻을 수 없다.

V. 結 論

SrO · 6Fe₂O₃ 電子세라믹스의 순환전압도는 중성, 산

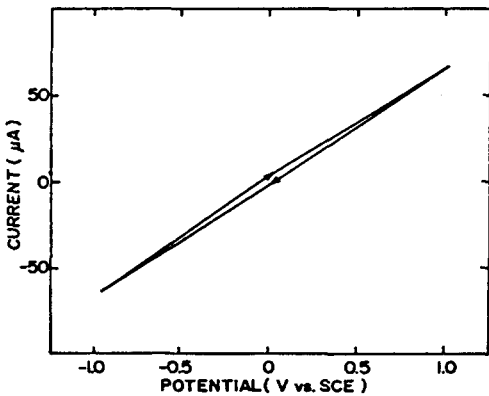


그림 5. SrO · 6Fe₂O₃ 電子세라믹스 / 10⁻¹M H₂SO₄ 水性電解質 界面에서 典型的인 循環電壓圖 (스캔전위 : -1.0 -1.0V vs. SCE, 스캔율 : 100mV/s, 스캔시간 : 60분, 표면적 : 5.5cm²)

Fig. 5. The typical cyclic voltammogram at SrO · 6Fe₂O₃ electronic ceramics / 10⁻¹M H₂SO₄ aqueous electrolyte interfaces (scan potential : -1.0 -1.0V vs. SCE, scan rate : 100mV/s, scanning time : 60 minutes, surface area : 5.5cm²).

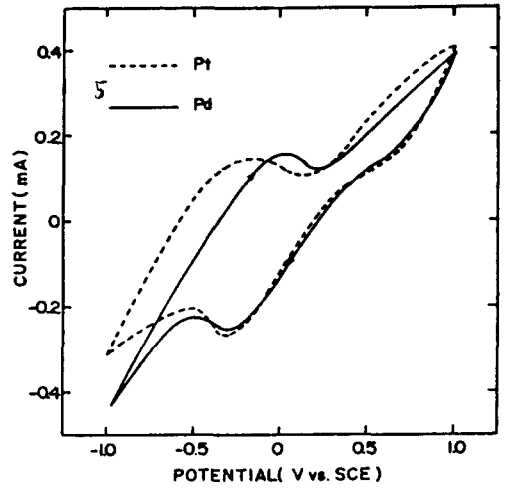


그림 6. (Pt, Pd) / 10⁻¹M H₂SO₄ 水性電解質 界面에서 典型的인 循環電壓圖 (스캔전위 : -1.0 -1.0V vs. SCE, 스캔율 : 100mV/s, 스캔시간 : 60분, 표면적 : 4.9cm²)

Fig. 6. The typical cyclic voltammograms at (Pt, Pd) / 10⁻¹M H₂SO₄ aqueous electrolyte interfaces (scan potential : -1.0 -1.0V vs. SCE, scan rate : 100mV/s, scanning time : 60 minutes, surface area : 4.9cm²).

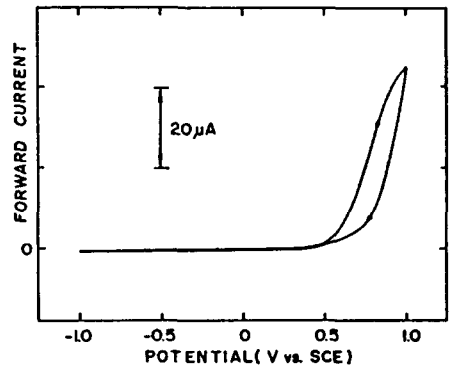


그림 7. p-GaP 半導體 / 10⁻²M CsNO₃ 水性電解質 界面에서 典型的인 循環電壓圖 (스캔 전위 : -1.0 -1.0V vs. SCE, 스캔율 : 100mV/s, 스캔시간 : 40초, 표면적 : 0.8cm²).

Fig. 7. The typical cyclic voltammogram at p-GaP semiconductor / 10⁻²M CsNO₃ aqueous electrolyte interface (scan potential : -1.0 -1.0V vs. SCE, scan rate : 100mV/s, scanning time : 40 seconds, surface area : 0.8cm²).

성, 염기성 전해질의 pH 및 이온농도에 상관없이 선형적이며 대칭적인 전류-전압 특성을 나타낸다. 계면에 형성된 전기이중층의 전기등가적 성분은 저항 성분에 의하여 결정된다. 고농도의 전해질에서는 이온농도에 따른 큰 전기전도도에 의하여 SrO·6Fe₂O₃ 電子세라믹스의 다공성 효과는 나타나지 않는다(무시된다). 반면에, 저농도의 전해질과 증류수에서는 다공성 효과와 그에 따른 전류 증가 및 포화현상이 나타난다. SrO·6Fe₂O₃ 전자세라믹스 표면에 노출된 기공에 흡착되는 H₃O⁺ 또는 OH⁻ 이온들은 정전기적인 물리적 흡착이 아닌 특이흡착을 한다. SrO·6Fe₂O₃ 전자세라믹스는 반도체는 물론 백금과 Palladium과 같은 귀금속과도 비교할 수 없는 뛰어난 선형 및 대칭적인 전류-전압 특성을 가지고 있으므로 전기화학용 저항, 전극, 그리고 습도 감지소자 등에 응용할 수 있다. 특히, SrO·6Fe₂O₃ 전자세라믹스가 우수한 자성체임을 고려하면 자화된 계면에서 이온 및 대전된 콜로이드의 電磁氣의 운동 효과를 화학적 작용과 영향없이 정확하게 연구조사할 수 있는 소재로서 큰 의의가 있다.

參 考 文 獻

[1] R. Simon and A. Smith, *Superconductors*, Plenum, 1987.
 [2] A. J. Moulson and J. M. Herbert, *Electroceraamics*, Chapman and Hall, 1990.

[3] W. Buckel, "Superconductivity," VCH, pp. 25-27, 1991.
 [4] H. I. Refioglu, Ed., *Electronic displays*, Wiley, pp. 43-85, pp. 137-174, 1983.
 [5] F. L. Carter, *Molecular electronic devices*, Dekker, 1982.
 [6] A. J. Moulson and J. M. Herbert, *ibid*, pp. 405-426, 1990.
 [7] A. J. Bard and L. R. Faulkner, "Electrochemical Methods," Wiley, pp. 213-248, 1980.
 [8] A. J. Moulson and J. M. Herbert, *ibid*, pp. 163-166, 1990.
 [9] W. D. Kingery, H. K. Bowen, and D. R. Uhlmann, "Introduction to ceramics," 2nd Ed., Wiley, pp. 516-580, 1976.
 [10] K. Othmer, Ed., "Encyclopedia of chemical technology," 3rd ed., vol. 9, Wiley-Interscience Pub., pp. 881-902, 1979.
 [11] K. H. Hellwege and A. M. Hellwege, Ed., "Numerical data and functional relationships in science and technology," vol.4(Magnetic and other properties of oxide and elated compounds), Springer-Verlag, pp. 557-566, 1970.

著 者 紹 介

千 長 鎬 (正 會 員) 第 28卷 A編 第 6號 參照
 현재 광운대학교 전자공학과
 교수

羅 克 煥 (正 會 員) 第 28卷 A編 第 6號 參照
 현재 광운대학교 전자공학과
 교수



趙 銀 喆 (學 生 會 員) 第 28卷 A編 第 6號 參照
 현재 광운대학교 전자공학과
 대학원 재학