
이산화티타늄을 사용한 무기질 박막형 태양전지의 제작

Manufacture of Inorganic Materials Thin Film Solar Cell using Titanium Dioxide

이경호

경주대학교 환경에너지학과

Kyung-Ho Lee(leekh@gnu.ac.kr)

요약

본 연구의 목적은 태양전지의 변환효율을 높이기 위한 박막형 소재 물질 개발과 전지의 조립과정을 개선·발달시키기 위한 것이다. 이 연구에 사용된 이산화티타늄은 물과 알콕사이드 몰비, 용액 pH의 변화, 분말의 목침조건 등 반응조건을 조절한 솔-겔 방법에 의하여 조제되었다. 준비된 이산화티타늄은 300~750°C의 열처리조건 범위에서 소결하였다. 600°C의 열조건에서 만들어진 이산화티타늄은 XRD 패턴에서 강한 세기의 아나타제형이 나타났고, 750°C에서 소결되었을 때에는 아나타제형과 루틸형의 혼합물이 나타났다. 또한 소결온도와 목침시간 등에 따라 합성된 이산화티타늄의 특성은 목침시간이 증가함에 따라 아나타제형 결정으로 변환되는 것을 확인할 수 있었다. 한편 전류밀도는 목침시간과 온도에 따라 증가하였고, 변환효율은 전류밀도의 증가로 역시 증가함을 알 수 있었다. 산소분위기하에서 산소와 카드뮴텔루라이드의 화학결합이 생성됨을 관찰할 수 있었고, 카드뮴텔루라이드의 박막위의 산소가 크롬메이트와 하이드라진 처리에 의하여 감소되는 것을 알 수 있었다. 결론적으로 공기분위기하에서 550°C의 급속 소결 조건에서 만들어진 카드뮴텔루라이드의 에너지변환효율은 0.07cm², 1.0cm²의 면적에 대해 각각 12.0%, 6.0%로 나타내었다.

■ 중심어 : | 광촉매 | 솔-겔 방법 | 아나타제 | 에너지변환효율 |

Abstract

The purpose of this research is to develop thin film materials and fabrication process for efficient TiO₂/CdTe solar cells. In this work photocatalyst titanium dioxide was prepared by sol-gel procedure according to reaction condition, the mole ratio of H₂O/TTIP, pH of solution and aging condition of powder. The prepared titanium dioxide was thermally treated from 300 to 750°C. Maximum intensity of anatase phase of titanium dioxide was achieved by calcination at 600°C for 2 hr. And it was mixture of anatase and rutile phase when temperature of calcination was 750°C. It has been known that the properties of synthesized titanium dioxide according to aging time and calcination temperature was converted to anatase phase crystal on increasing of aging time. Also the current density has been increased with aging time and temperature, the efficiency has been increased with because of reason on above results. The formation of chemical bonding on oxygen and cadmium telluride under oxygen circumstances had been observed, and oxygen of thin film surface on cadmium telluride had been decreased with the treatment of chromate and hydrazine. As results had been shown that the energy conversion efficiency of cadmium telluride use by rapidly treated heat at the condition of 550°C under air circumstance got 12.0%, 6.0% values according to 0.07cm², 1.0cm² surface area, respectively.

■ keyword : | Photocatalyst | Sol-gel Procedure | Anatase | Energy Conversion Efficiency |

* 본 논문은 2008년도 경주대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

접수번호 : #090813-003

심사완료일 : 2009년 10월 05일

접수일자 : 2009년 08월 13일

교신저자 : 이경호, e-mail : leekh@gnu.ac.kr

1. 서론

최근에는 심각한 환경 문제 등으로 태양광 발전과 같은 신재생에너지에 대한 관심이 점점 증가하고 있다. 태양광발전은 화석연료를 대체할 에너지원으로서 인식되었으나 현재는 오염물질 및 지구온난화현상을 초래하는 부산물이 전혀 없는 “청정에너지원”으로 새롭게 인식되고 있고, 반도체 제조 기술의 발전에 의해 태양전지에 의한 연구가 계속 이루어지고 있다. 이러한 풍부한 태양에너지를 이용하여 에너지원으로 이용할 수 있도록 한 것이 태양전지 시스템이다.

태양전지는 구성하는 물질에 따라 실리콘화합물 반도체와 같은 무기물질소재로 이루어진 태양전지, 유기물질을 포함하고 있는 유기질 태양전지로 나눌 수 있다. 무기태양전지의 대표적인 실리콘 태양전지는 크게 단결정형태와 다결정형태의 재료로 나뉘며 기본적으로 P-N 동종접합(homogeneous junction)으로서 태양전지에 사용된다. 그리고 CdTe, CuInSe₂계의 화합물 반도체를 소재로 한 것이 박막형 태양전지[1-5]이다. 비정질 실리콘에 비해 효율이 높고 초기열화 현상이 없는 등 비교적 안정성이 높은 태양전지이다.

TiO₂ 광촉매[6]는 수소 등 에너지 생산을 위한 물의 분해, 유해성 유기물 및 중금속의 제거에 널리 사용되고 있다. 광촉매 산화 반응에서는 유기물질들이 단순한 상변화에 의하여 제거되는 것이 아니라 완전 산화에 의하여 물과 이산화탄소 등의 무해한 물질로 전환되는 것이 가능하다. 따라서 생물학적 난분해성이며 유독성인 유기물질들을 처리하기 위한 수처리 공정으로서 반도체인 TiO₂를 이용하여 유기물질의 무기화를 극대화하고자 하는 많은 연구[7]가 이루어져 왔다. 이러한 특성을 가진 TiO₂를 제조하는 방법은 금속염을 열분해하는 열분해법[8], metal alkoxide의 가수분해와 축합반응을 거쳐 제조하는 sol-gel 법 등이 있다. 이 중 sol-gel 법[9][10]은 전구체가 싸싸다는 단점이 있으나, 순수한 TiO₂의 제조가 가능하고, 저온의 반응 조건에서도 고순도의 금속 산화물을 얻을 수 있으며 미세구조 및 물성 제어가 용이하다는 장점이 있다. CdTe는 두 가지 측면에서 태양전지에 이상적인 물질로 간주되고 있다. 첫 번째는 밴드에너지 갭[11][12]이 1.45 eV인 직접천이형

반도체로 태양에너지의 스펙트럼을 고려했을 때 에너지 변환에 가장 적합하고[13] 두 번째로는 다양한 방법을 이용하여 높은 증착속도로 박막을 균일하게 증착할 수 있다. 그러나 CdTe 태양전지에서 가장 중요하게 해결해야 할 과제는 여전히 저항이 낮고 안정성 있는 배면전극을 형성하는 것이다. CdTe의 일함수가 매우 크고 자기보상효과 특성으로 인해 P형-도핑이 매우 어렵기 때문에 저항 접합을 형성하기가 매우 어렵다. CdTe 태양전지는 일반적으로 기판온도가 450°C 이상이 되면 조성비가 일정하고 안정적인 박막이 형성되며[14] 고온에서 생성된 박막은 약간의 Cd 빈공간에 의해 P형을 나타낸다고 알려지고 있다[15]. 또한 CdTe의 접합 쪽으로는 격자 불일치가 매우 적은 TiO₂를 적용하여 n-TiO₂/p-CdTe 이종접합을 구성한다[16]. N형(N-type) CdS는 In₂SnO₃와 같은 투명전극이 증착된 유리 기판에 증착한다. 그 후 광흡수 층인 CdTe를 증착하고 마지막으로 배면전극 물질을 증착한다.

CdTe 태양전지의 제조방법으로는 근접승화법[17], 액상석출법[18], 진공증착법[19]이 많이 사용되고 있다. 최근의 연구결과로 근접승화법, 스크린프린팅법[20], 전착법[21]등의 여러 가지 방식으로 CdTe 박막을 제조하여 에너지변환효율[22]을 높이고 있다. 다결정 박막형 카드뮴 텔루라이드(CdTe)를 사용한 태양전지는 비정질 Si전지와 CuInSe₂계 전지와 함께 가장 실용성이 있는 박막형 전지로 평가받고 있으며 비정질 Si에 비해서는 에너지변환효율이 높고 성능의 안정성이 우수하며 CuInSe₂계 전지에 비해서는 대량생산에 훨씬 용이하다는 장점을 갖추고 있다. 현재 CdTe 전지의 에너지 전환효율은 15.8%가 최고 기록이며, 앞으로 후면 금속전극의 전기저항을 낮추는 등의 기술적인 문제가 해결되면 18.0%까지 향상될 전망이다. CdTe 전지는 세 가지 다른 화합물 반도체 층과 한 가지 투명전극 및 두 가지 금속전극으로 구성되어 있고 각 구성요소들의 전기적 광학적 특성에 따라 태양전지의 효율 및 안정성이 결정된다. 기술적으로 태양전지가 경제성을 갖기 위해서는 현재보다 최소 6배 이상 효율을 높게 만들어야 하는데, 여기서 우리는 기존의 CdS/ITO 및 CdS/Cu를 사용하지 않고 TiO₂/CdTe 박막 위에 금속열처리법을 이용하여 에너지전환효율을 높이고자 한다.

본 연구에서는 기존 결정질 실리콘 태양전지는 한계가 있으므로 Sol-Gel법을 이용하여 만들어진 $TiO_2/CdTe$ 박막 합성에 최적조건을 확립하고, 물리적·화학적 특성을 연구하는데 XRD, SEM-EDX, XPS, Alpha-stepm Surface200 등을 이용하여 물성조사를 하고, 고효율을 보이는 태양전지물질을 개발하고자 한다.

II. 이론적 배경

광화학반응은 반응물질의 광흡수에 따른 여기상태를 거치면서 반응이 진행되지만 이산화티탄과 같은 반도체를 이용한 광촉매반응에서는 광여기된 광촉매가 반응물질의 반응에 직접 간여하게 된다. 이산화티탄뿐만 아니라 일반적으로 4d궤도의 전자배열을 갖는 금속산화물 반도체들은 자신이 보유하고 있는 밴드갭 에너지보다 큰 에너지의 빛을 흡수하면 가전자대(valence band)의 전자가 전도대(conduction band)에 광여기되어 전도대에는 자유전자(-전자), 반면에 가전자대에는 정공(+전자)이라는 전하쌍이 생성된다. 이러한 반도체들이 광촉매로 활용 시에는 [그림 1]에서 보는 바와 같이 전하쌍인 전자-정공이 각각 환원반응과 산화반응을 유발시켜 광촉매반응이 진행된다. 한편, 이들 반도체들을 외부회로에 연결하여 전자의 이동을 도모하면 전기를 생산하게 된다. 이때 전자와 정공이 재결합하면 반응이나 전류 발생은 일어나지 않지만 이것들을 분리하는 전하분리 메커니즘이 반도체 표면에서 이루어진다.

[그림 2]에서 나타난 예로 n-형 반도체를 수용액 중에 담그면 전도대에서 용액에 전하이동이 일어나고 반도체 내부에는 전자밀도가 작아지기 때문에 표면으로부터 수백nm 이상에 걸쳐서 공간전하층(space charge layer)이 형성된다. 따라서 표면으로부터 반도체 내부로 전위구배가 발생하여 전도대와 가전자대는 구배를 갖고 휨이 발생한다. 이러한 전위구배 중에서 전자는 반도체 내부로 향하는 힘을 받는 반면에 정공은 표면으로 향하는 힘을 받아서 전하분리(charge separation)가 발생된다.

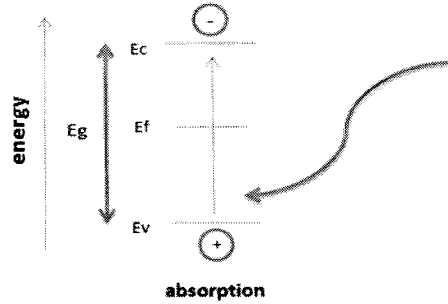


그림 1. 고유 반도체에 의한 광흡수. 가전자대(Ev)로 부터 전도대(Ec)까지의 전자전이를 일으키는 총흡광자.

이와 같은 전하의 분리를 최대한 활용하여 전자의 이동을 외부회로로 도모하여 전기를 발생시키는 것이 광화학태양전지의 핵심이다. 그러나 일차 분리된 전하들은 전자와 정공의 전기적 성질로 인하여 nanosec의 빠른 속도로 재결합이 되어 태양전지의 효율을 저하시키는 원인이 되기 때문에 재결합을 지연 또는 억제하는 것이 중요한 연구영역의 하나이다.

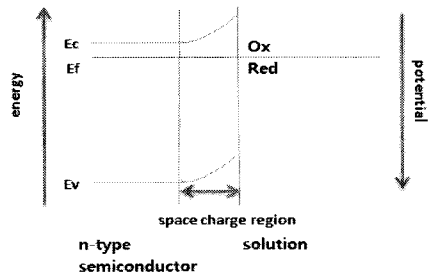


그림 2. 산화환원쌍인 n-형 반도체와 수용액 간의 접점 생성에 관한 에너지준위와 굽힘대의 개략도.

또한 이산화티탄 박막형 태양전지의 경우에 활용이 가능한 광 에너지가 자외선 영역대라는 과장의 제한성이 가장 먼저 해결하여야 할 분야이다. 따라서 가시광선에 의하여 이산화티탄 등 반도체 금속산화물을 활용하는 광화학 태양전지의 전하이동을 돕는 방안으로 염료감응제(dye-sensitizer)를 이산화티탄 표면에 흡착시키는 것이 제시되었다. 이들 광감응제들은 약 500~600nm대의 가시광선을 흡수하여 기저상태에서 여기상태로 된 후 자신의 전자를 반도체 물질의 전도대로 주입시켜

서 외부회로로 전자의 이동이 가능하게 한다. 이러한 공정을 광 감응반응 이라고 하고 [그림 3] 에 예시하였다. [그림 3] 에서 보는 바와 같이 광 감응 염료의 기저 상태의 에너지 준위는 반도체 이산화티탄의 가전자대보다 더 negative한 위치에 있어야 하며 여기상태의 에너지 준위는 반도체 이산화티탄의 전도대보다 역시 더 negative한 위치에 있어야 한다. 이와 같은 광 감응 이산화티탄 박막형 광화학태양전지 구성에 많이 사용되는 광감응 염료들로는 ruthenium(II) polypyridyl 복합체인 [CN(bpy)₂Ru-CN-Ru(dcbpy)₂], erythrosin B, thionine, [Ru(4,4-bis(carboxy)-bpy)₂(NCS)₂], [Ru(2,2',2''-(COOH)₃-terpy)(NCS)₃] 등이 있으며 이외에도 Ru(bpy)₃²⁺ 및 그 유사체 등이 사용되고 있다. 최근에는 Cyanin dye와 계가 Ru(bpy)₃²⁺ 일종인 tris(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate) rutheniumIII 등이 적용되고 있다.

Tris(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylate) ruthenium(III) 물질은 산화/환원형이 매우 안정하며, 산화와 환원 공정이 가역적이므로 재생이 가능한 장점이 있고 이로 인해 반응을 계속 지속시킬 수 있어 매우 유용하다. 이 물질은 자외선 영역의 빛과 가시광선 영역의 빛을 잘 흡수하므로, 태양광 이용을 매우 효과적으로 할 수 있다. 일반적으로 이산화티탄의 표면은 pH에 따라서 표면의 전기적 상태가 달라지는데 pH_{ZPC}(zpc; zero proton condition=5~6.2)이하의 산성조건에서는 -OH⁺의 전기적 상태가 지배적으로 된다. 이러한 산성조건에서는 카르복실 그룹(-COOH)을 갖는 광감응체들은 이산화티탄에 흡착이 잘 이루어진다.

광전기화학전지(photoelectrochemical cell, PEC)는 Ru(II)계열 염료를 입힌 이산화티탄 박막을 광산화전극으로 사용하여 이 전극에 빛을 조사시키면 염료의 중심금속이 들떠 산화되면서 전자(e⁻)가 이산화티탄의 전도대로 주입되어 전도성 유리에 전자들이 모여 외부 회로를 따라 광산화 전류를 흐르게 한다.

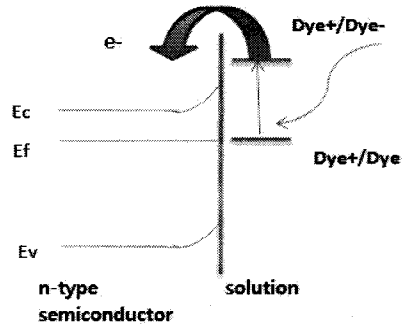


그림 3. 염료감응형 반도체 표면에서의 전자전이.

이때 산화된 염료는 전해질에 존재하는 산화/환원제에 의해 다시 환원되고 상대전극에서는 전자를 받아 전해질속의 산화종을 환원시킴으로써 전자를 재생시킬 수 있다. 이러한 전자이동에 따른 반응메커니즘을 [그림 4] 와 같이 나타낼 수 있다.

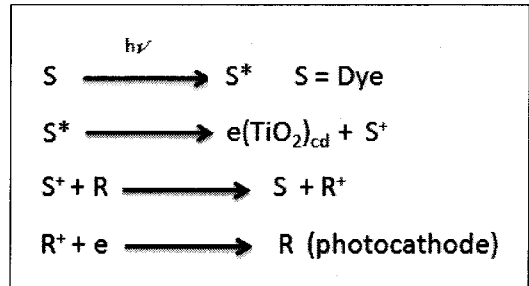


그림 4. 광화학전지의 전자이동에 따른 반응메커니즘

광전기화학 태양전지의 광전기변환특성은 에너지변환효율과 IPCE(Incident Photon to Current Efficiency)에 의하여 평가할 수 있다. IPCE는 임의의 파장의 빛에너지를 전자로 변환된 광자수의 비율을 %로 나타낸 것으로 조사하는 빛의 파장을 연속적으로 변화시키면서 전지의 기전력을 측정하는 것이다. 또 색소 자신의 광전기변환특성은 양자효율을 이용하여 평가하는데 흡수된 광자 1개에 대하여 외부회로로 흐르는 전자의 수의 비로써 나타낸다.

• 에너지변환율

$$\text{에너지변환율}(\eta) = \text{입사광에너지}(W) / \text{출력}(W) (1)$$

에너지변환율은 태양전지를 평가하는 가장 중요한 값이다. 실리콘 태양전지의 경우, 단결정형이 15~19%, 다결정형은 12~17% 그리고 비정질형이 10~12% 정도로 알려져 있다.

• IPCE

$$IPCE(\phi \text{ i} \times A) = \text{외부회로를 흐르는 전자수}(S^{-1}) / \text{색소에 입사된 광자수}(S^{-1})$$

$$= 1240(I_{sc} / \lambda \phi) \quad (2)$$

λ : 파장(nm)
 ϕ : 빛의 세기(W/cm²)

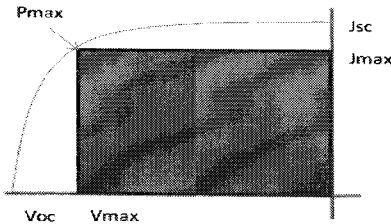
• 양자효율

$$\text{양자효율}(\phi) = \text{외부회로를 흐르는 전자수}(S^{-1}) / \text{색소에 흡수된 광자수}(S^{-1})$$

$$= 6.24 \times 10^{18} \times I / (A \times F_i) \quad (3)$$

그리고 광전기화학전지의 효율을 나타내는 척도로는 Fill Factor(FF)와 광전환 효율(η)을 [그림 5]에 나타내었다. 여기서 V_{max} , J_{max} 는 PEC로부터 생성되는 최대전력(P_{max})을 나타내는 전압과 전류이고, P_{in} 은 조사된 빛의 세기이다. V_{oc} (open-circuit current photovoltage)는 회로에 큰 저항이 걸려 광전류가 흐르지 않을 때 생성된 광전압으로 전지에서 얻을 수 있는 Gibbs 자유에너지이다. J_{sc} (short-circuit current density)는 광전압이 생성되지 않았을 때, 전지에서 얻을 수 있는 최대 전류밀도이다.

한편, 태양전지의 도달하는 태양에너지가 모두 전기 에너지로 변환되지 않는 이유, 즉 태양전지의 변환효율에 영향을 미치는 인자들을 다음과 같이 열거할 수 있다.



$$FF = V_{max} * J_{max} / V_{oc} * J_{sc}$$

$$\eta(\%) = (V_{max} * J_{max} / P_{in}) * 100$$

$$= (V_{oc} * J_{sc} * FF / P_{in}) * 100$$

그림 5. 광속 존재하에서 이상적인 전류-전압 곡선.

- 태양전지의 표면에 조사되는 태양광의 반사에 의한 손실이 있다.
- 태양전지가 태양광의 모든 파장을 흡수할 수 없다. 장파장의 가시광선을 흡수할 수 있는 색소의 선택이 필요하다.
- 전자, 정공의 발생이 100%가 되지 않는다. 빛이 조사되어도 전자, 정공이 발생되지 않는 경우도 있고, 발생하여도 수명이 짧아서 즉시 소멸할 수 있다.
- 태양전지가 흡수한 광자의 수만큼 전자, 정공의 생성이 100%가 되지 않는다. 분리된 자유전자와 정공은 전극방향으로 이동 중에도 일부 소멸한다.
- 태양전지 내부에 전기저항이 있다. 전극부의 전기저항이 있어 발생한 전기를 전부 외부에 내놓지 못하고 FF를 저하시킨다.

이러한 영향들에 의한 손실을 줄이는 노력이 고효율 태양전지를 제조하는 것과 직접적으로 연결된다.

[그림 6]에서 보는바와 같이 실제로 광감응 TiO₂ 태양전지를 제작하여 염료를 활용하지 않은 bare TiO₂ 박막만의 전지와 J-V 특성을 동일 강도와 파장의 빛을 조사하여 비교하였고, 광감응 염료를 적용한 전지가 훨씬 향상된 약 -0.55V의 Voc, 그리고 약 1.8mA/cm²의 Jsc를 갖는 것을 알 수 있다.

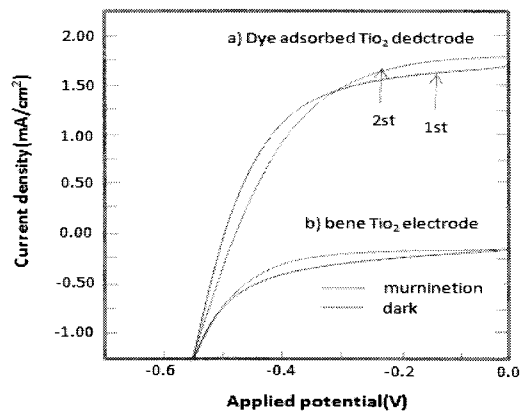


그림 6. 0.17몰 초산 전해질 용액에서의 광감응 이산화티타늄(a)과 초산이 존재하지 않는 노출된 이산화티타늄(b)의 J-V 곡선.

III. 실험

1. 실험조건

전체적인 CdTe 박막형 태양전지 제조 공정은 선행연구를 통해 얻어진 TiO₂, CdTe 제조조건이나 배선 금속층 조건에 따른 물리적, 전기적 특성 연구결과를 바탕으로 태양전지 제조 공정단계를 확립하였다. TiO₂ 증착 및 열처리, CdTe와 배선금속 증착조건은 일정하게 하였으며, CdTe 열처리 온도 및 분위기를 변화시켜 가면서 이에 따른 물리적, 전기적 특성 및 에너지 변환 효율의 변화를 관찰하였다. [그림 7] 은 제조된 태양전지의 효율과 전기 광학적 특성을 측정하기 위한 시편의 단면도이다.

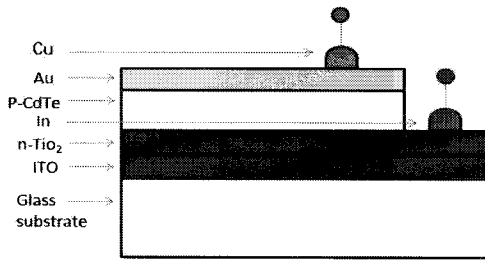


그림 7. 전기광학적 특성의 측정을 위한 시편 단면도.

2. 실험제작

2.1 이산화티타늄

실험에 사용한 이산화티타늄 나노 분말은 졸-겔 방법으로 합성한 루타일(rutile)상의 구형 분말을 사용하였다. 합성방법은 [그림 8] 과 [그림 9] 에서 보는 바와 같이 titanium isopropoxide (TTIP, Junsei Chemical Co., >98%)를 출발 물질로 하여 식(1)과 같이 물과 가수분해 반응을 진행 시켰다. 합성 반응 시 숙성 시간 및 온도를 조절하여 질산으로 해교 후 다양한 입자의 크기를 갖는 티타니아 졸(titania-sol)을 얻을 수 있었다. 제조된 졸을 도가니에 담아 500℃에서 2시간 동안 소결시킨 다음 이산화티타늄 샘플을 얻을 수 있었다.

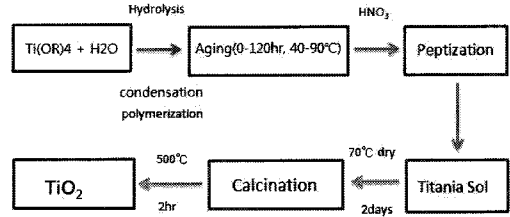


그림 8. 졸-겔 방법을 이용한 이산화티타늄 나노입자의 합성과정.

이렇게 제조된 나노 이산화티타늄 분말을 아세틸 아세톤을 기본 용매로 하여 hydroxy-propyl cellulose (Mw. 80,000, Aldrich)와 함께 고에너지 Zr ball mill (Planetary Mono Mill, Fritsch)을 이용하여 페이스트화 하였다. 세척된 Indium tin dioxide(ITO) 기판위에 제조된 페이스트를 떨어뜨린 후 squeeze printing 방법으로 코팅하였다. 광전극은 정사각형의 형태로 0.25cm²로 제작한 후 분당 2℃씩 승온하여 500℃에 도달한 후 2시간 정도 열처리 하였다. 이렇게 제조된 나노 다공성 이산화티타늄 전극 막을 에탄올을 용매로 24시간 흡착 시켰다.

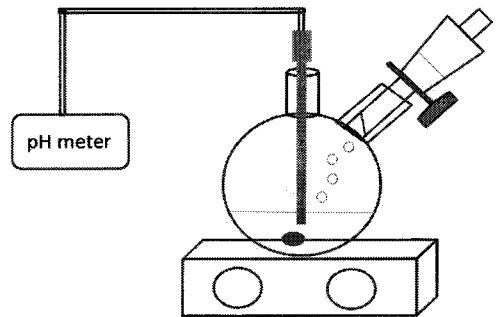
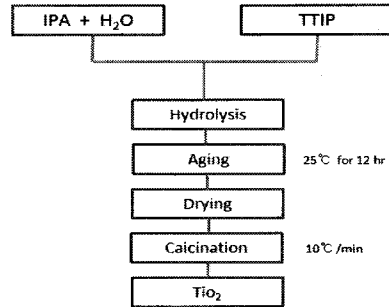


그림 9. 이산화티타늄 나노분말 제조를 위한 졸-겔 방법

2.2 CdTe

소스로는 단결정 CdTe를 이용하여 1×1×0.3cm 크기로 절단하여 제작한 5N순도의 CdTe를 사용하였다. 절단된 CdTe블록은 mechanical polishing을 거친 후, 3% bromine-methanol-용액으로 5분간 에칭하여 경면처럼 만들어 사용한다. 분말형 소스를 사용하여 박막을 제조할 때에는 증착 전에 챔버 내부의 온도를 올려 소스 내에 잔존하는 free Te를 제거해 주어야 한다.

기판 세척과정은 2% Micro-soap 수용액 내에서 초음파를 5분간 가한 후, DI Water와 methanol로 세척하고 N₂ 가스로 blowing하였다. CdTe 박막은 Ar과 N₂ 분위기 하에서 증착하였다. 증착과정은 기판을 올려놓은 스페이서 블록을 소스 블록과 기판 블록 사이에 넣고 고정시켜준다. 챔버를 닫고 mechanical pump를 이용하여 진공을 1×10⁻³Torr까지 낮추고 제어판으로 원하는 증착온도를 profile을 설정하고 증착시킨다. 흑연 블록 표면에 흡착되어 존재할 수 있는 수증기 등의 불순물을 제거하기 위해 증착이 시작되기 전에 150℃~250℃의 범위의 온도에서 N₂ 가스를 이용하여 purging해 주었다. 증착 시에는 Ar 가스를 챔버 내에 불어넣어 원하는 증착압력을 얻고 소스와 기판의 온도를 달리하여 빠른 속도로 증착하였다. 증착 후에는 N₂ 가스분위기 하에서 서서히 냉각시켰다.

표 1. 박막형 태양전지의 제조 항목에 따른 실험방법 및 조건

항 목	실험방법 및 조건
기판	ITO/glass
TiO ₂ 제조	Aging 반응조건 90℃/2hrs, 45℃/2hrs
TiO ₂ 제조 및 열처리	열처리온도 300℃,400℃,500℃,600℃,750℃
CdTe 제조	진공증착법 : 기판온도 280℃, 1-5min.
CdTe 열처리	급속열처리 : 450-600℃, 2min.
전처리	chromate(10sec)→hydrazine(1min.)
배선금속	Cu(100) →Au(400)
후열처리	급속열처리 : 200℃ 4min., 250℃ 4min.

3. 실험공정

CdTe 태양전지의 제조는 [표 1] 에서 보는 바와 같이 기판으로는 진공증착법으로 기판온도 200℃에서 제조

한 TiO₂박막을 이용하였고, 이 결과 중 최적의 전지 특성을 보이는 일정조건에 대해 제조가 편리하고 경제성을 지니며 현재까지 최고의 2000Å의 두께로 제조하여 이의 결과를 진공증착법 TiO₂와 비교하였다. 제조된 TiO₂박막은 CdCl₂ + CH₃OH 용액에 담근 후 DI water로 세척하여 400℃에서 20분간 질소분위기에서 로열처리를 하였다. CdTe 박막 증착 시 기판온도는 280℃로 일정하게 유지시켰으며, 0.8-1.2(마이크로/min.)정도의 증착속도로 3-4μm 정도 두께의 박막을 제조하였다. CdTe의 열처리는 급속열처리방법을 사용하였으며, CdTe의 열처리 분위기로 널리 사용되는 공기 분위기에서 450-600℃온도로 2분간 열처리 하였다. 최종 전기 구성을 위해서는 배선금속층을 제조하게 되는데 배선금속증착 전 전처리 용액으로는 K₂Cr₂O₇ + H₂SO₄(10%, 10초)와 H₂N₂O₂(hydrazine hydrate, 1분)를 사용하였으며 배선금속으로는 Cu와 Au층을 각각 100Å, 400Å 두께로 연속 증착하였다. Au/Cu의 배선금속 증착 후 최종 열처리방법으로 기존의 오븐에 의한 150℃온도에서의 1시간이상의 열처리 방법대신에 200℃와 250℃에서 각각 4분간 열처리하는 방식을 사용하였다.

4. 실험기기

TiO₂박막의 결정구조는 X-ray diffractometer를 사용하여 측정하였고, 두께측정에는 Alpha-stepTM surface 200 을 사용하였다. 표면의 미세구조는 알아보기 위하여 SEM-EDX를 사용하였고, CdTe와 산소간의 화학적 결합형성을 관찰하기 위하여 XPS를 사용하였다.^[23] 제조된 CdTe 박막 층은 SEM-EDX와 온도에 따른 XRD를 이용하여 열처리된 CdTe 박막의 기본물성을 분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 합성된 TiO₂의 물리·화학적 및 전기적 특성

합성된 TiO₂의 숙성시간 및 온도에 따른 XRD패턴을 [그림 10] 에 나타내었다. 합성된 TiO₂는 염료(dye, N 719) 흡착에 용이한 높은 표면적을 가진 101, 004, 200면의 아나타제(anatase) 상으로 이루어져 있었다. 합성 시

숙성 온도의 45°C와 90°C에서 모두 초기 숙성시간 없이 바로 해교를 하였을 때는 110면의 루틸(rutile) 상의 결정으로 나타났다. 그리고 숙성 시간이 증가 할수록 101면의 아나타제 상의 결정으로 변환되는 것을 확인 할 수 있었다. [그림 10] 에서 보는 바와 같이 숙성온도 90°C가 45°C에 비해 아나타제 결정 감도를 이루는 TiO₂로 합성이 용이함을 알 수 있었다.

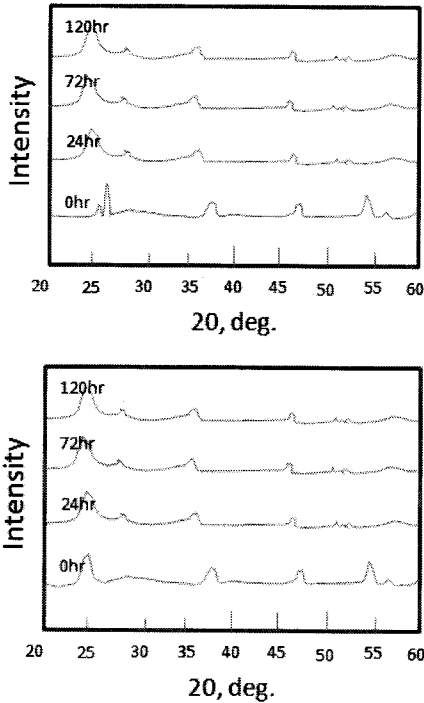


그림 10. 45°C(a) 와 90°C(b)에서의 숙성시간에 따른 XRD 패턴

[그림 11] (a)는 45°C와 90°C에서 합성된 TiO₂를 사용하여 전극막으로 제작하여 전류밀도-전압 곡선을 측정 한 데이터이다. 염료의 흡착량 및 무기질 박막형 태양 전지의 효율의 경우 전류밀도의 양과 밀접한 관계가 있다. 45°C에서는 11.95mA/cm²의 전류밀도값을 갖고, 보다 높은 온도인 90°C에서의 전류밀도값은 17.50mA/cm²의 값을 가져 5.50mA/cm² 만큼 증가하였다. 또한 [그림 10] (b)는 숙성시간 0~120시간 사이에서의 전류밀도-전압의 결과이다. TiO₂ 합성 시 숙성시간이 증가되면서 전류밀도의 양은 6.68mA/cm²에서 12.98mA/cm²로 증가되어 효율은

2.6%에서 4.9%로 증가됨을 확인 할 수 있었다. 숙성시간이 증가되면 전류 밀도의 양이 증가됨을 알 수 있었다. 따라서 [그림 10] 에서 보는 바와 같이 TiO₂의 아나타제 결정도의 증가는 전류밀도 값이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

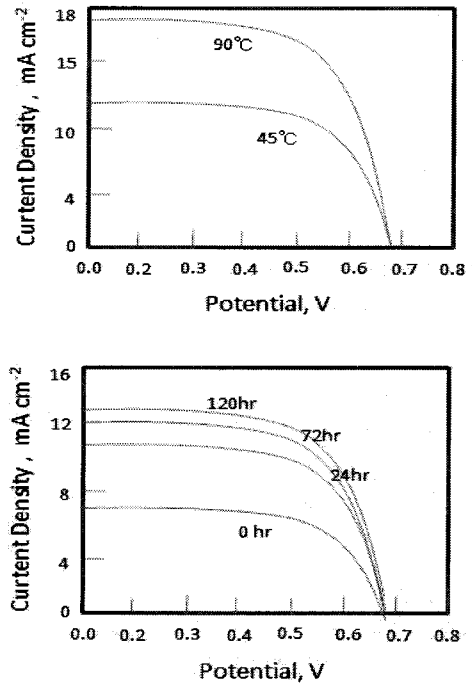


그림 11. 숙성시간과 온도에 따른 합성된 박막형 이산화티타늄에 대한 전류밀도-전압 곡선

[그림 11] 에서 보는 바와 같이 박막형 태양전지에서 주된 역할을 하는 TiO₂ 전극막의 제작에서 합성된 TiO₂의 아나타제 결정도의 증가는 박막형 태양전지의 효율을 상승시킨다. 이는 TiO₂의 화학적 구조에 대한 특성이 박막형 태양전지의 효율에 밀접한 영향을 주는 것을 알 수 있었으며, 합성 시 가수분해(hydrolysis)와 축중합반응(condensation)을 조절하기 위한 숙성시간과 온도는 최적화된 TiO₂ 전극막을 제조함에 있어 매우 중요하다. 또한 숙성시간과 온도는 합성된 TiO₂의 화학적구조를 변형 시킬 수 있다.

2. CdTe의 물리·화학적 및 전기적 특성

ITO기판위에 진공증착법에 의한 CdTe 박막제조시 전지의 특성에 큰 영향을 주는 동정변수로는 증착 시 기판온도, 증착속도 등을 고려 할 수 있으며, 결정성의 향상이나 전기적특성의 향상을 위해서는 400°C이상의 열처리과정이 반드시 필요하다. CdTe 층 가운데 광흡수층인 CdTe의 물리적, 전기적 특성은 기판온도 및 증착속도에 크게 영향을 받게 되는데 선행연구결과에 의하면 250~300°C의 기판온도에서 우수한 결정성과 광학적 특성, 전기전도도를 보였으며, 250°C이하나 300°C 이상의 온도에서는 pinhole의 형성 및 Cd나 Te 중 한 성분이 과다하게 식출상으로 존재하는 비화학양론(non-stoichiometry)적인 CdTe 화합물이 형성되어 전기적특성이 저하된다.

CdTe와 같은 화합물 반도체의 경우 박막의 내부성분비와 표면성분비에 전기적 특성이 크게 의존하게 된다. 즉, Cd와 Te의 성분비에 의존하여 Cd과잉인 경우 n-형 반도체 특성을 보이게 되고, Te가 과잉일 경우에는 p형 반도체의 성질을 보이게 된다. 또한 p-형 CdTe의 경우에는 배선금속층 증착 시 저저항 접촉형성에 Te-과잉의 표면성분비가 요구되며, 이러한 CdTe 박막의 표면 성분비는 열처리 조건이나 배선금속 증착 전 전처리 조건에 큰 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 제조된 CdTe 박막전체의 내부성분비와 표면성분비를 각각 EDS와 XPS에 의해 측정된 결과 증착 시 기판온도와 열처리에 따라 두가지 성분비가 모두 변화하였으며, 280°C의 기판온도에서 증착한 후 450~550°C의 온도에서 금속열처리한 경우 내부성분비는 거의 1:1에 가까우며 표면 성분비는 3~4% Cd-과잉의 상태를 보였다. 그러나 600°C 이상의 경우 Te 성분의 재증발 정도가 크고, 이로 인해 pinhole 이 형성되어 내부성분비가 10% 이상의 Cd-과잉의 성분비를 보이고, 상대적으로 박막의 밀착성도 크게 저하되어 태양전지에 적합하지 않은 결과를 보였다. 본 연구의 제조법은 일반적인 진공증착법에 비해 기판과 증착원간의 거리는 4cm로 가깝게 하고 10⁻⁶Torr까지 압력을 유지시킨 후 고순도 아르곤을 챔버 내로 유입시켜 증착 시 진공도를 10⁻⁴Torr로 일정하게 함으로써 3~4분 내에 3~4μm 두께의 박막을 제조함으로써 증착원의 상태에 가장 접근한 화학양론(stoichiometry)적 박막을 형성 할 수 있었다. EDX에 의한 결과만으로 보면

열처리 전 후 CdTe가 동일한 1:1의 성분비를 나타내고 있으나 이와 같은 결과는 CdTe만이 존재하는 경우 이외에 Cd나 Te식출물이 CdTe와 동시에 존재하는 경우에도 관찰될 수 있으며, 잔류하는 Cd나 Te가 열처리 시 제거될 경우 EDX에 의한 성분비는 동일하더라도 박막 상태는 차이가 있으며 이를 SEM에 의해 확인할 수 있었다.

[그림 12] 와 같이 X-ray 회절분석 결과를 보면 CdTe 박막은 기판온도에 관계없이 증착 시와 열처리 후 모두 2θ 가 23.5° 인 Zinc Blend구조의 (111)방향으로의 우선성장방향을 보이고 있으나, 550°C에서 열처리를 거친 후 열처리 온도를 증감시킴에 따라 재결정에 의해 우선성장정도가 감소하고 있으며, 그림에서 보듯이 CdTe의 산화물로 여겨지는 피크가 관찰되고, chromate와 hydrazine 처리를 거친 후에는 산화물에 의한 피크를 감소시킬 수 있었다. 이러한 산화물의 형성 및 전처리에 따른 변화는 SEM에 의한 표면 관찰에서도 확인 할 수 있었으며, 공기분위기 열처리 효과는 CdTe 열처리 시 산소의 영향으로 볼 수 있는데 산소와 CdTe의 화학적 결합상태를 XPS에 의해 분석하였다.

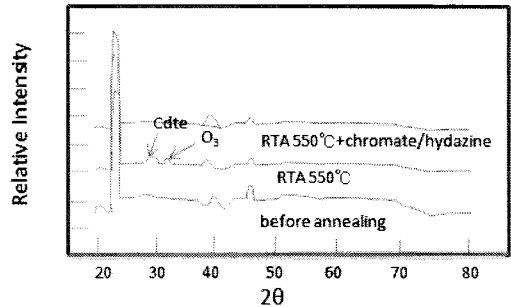


그림 12. 550°C에서 열처리한 X-선 회절 패턴.

[그림 13] 의 Te narrow scan data로부터 보면 열처리온도에 관계없이 산소분위기의 경우 CdTe와 산소간의 화학적 결합형성을 관찰 할 수 있었으며, CdTe 박막 표면의 산소성분은 chromate와 hydrazine 처리 후 감소하지만 Cd₃₆₅, Te₃₆₅, O_{1s}의 피크를 narrow scan하여 정량화한 [표 2] 에서 보듯이 표면 처리과정을 거친 후 열처리전의 성분비에 접근시킬 수는 있었으나 CdTe내 강한 결합을 형성하고 여전히 잔류하고 있다.

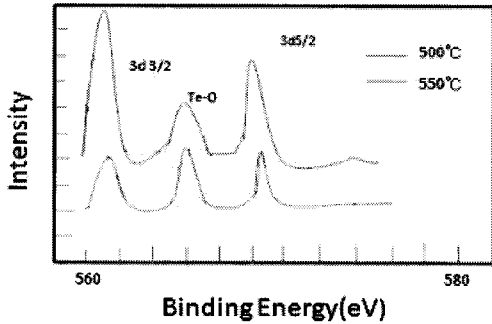


그림 13. XPS를 이용한 텔루라이드 피이크의 narrow scan에 대한 결과.

또한 CdTe의 표면성분비는 [표 2] 에서 보는바와 같이 배선금속 증착 전 표면처리과정을 거친 후 Te 과잉 상태로 성분비가 변화하였다. O의 성분비가 열처리 전에는 7.6%에서 450°C에서는 30.8%, 500°C에서는 38.5%, 550°C에서는 42.3%까지 증가하였다. 열처리할 때는 Cd, Te, O는 온도가 높아질수록 CdTe의 성분비는 낮으며 O는 현저히 증가하였다. 그러나 chromate-hydrazine 처리 후에는 Cd, Te는 열처리 후 보다 높지만, O의 경우는 낮은 것을 볼 수 있다.

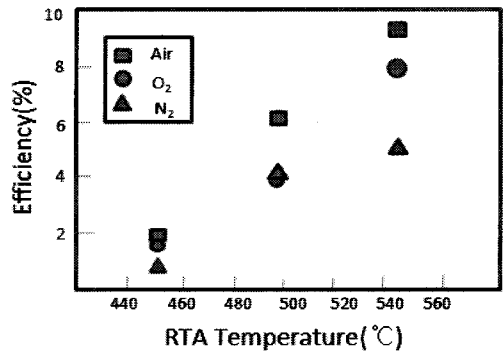
표 2. narrow scan 상용 XPS 결과에 따른 카드뮴 : 텔루라이드 : 산소 표면 성분비 변화

열처리조건	성분	Cd (%)	Te (%)	O (%)
열처리 전		47.3	45.1	7.6
450°C 열처리 후		36.3	32.9	30.8
500°C 열처리 후		32	29.5	38.5
550°C 열처리 후		30.8	26.9	42.3
chromate-hydrazine 처리 후		37.0	48.5	14.5

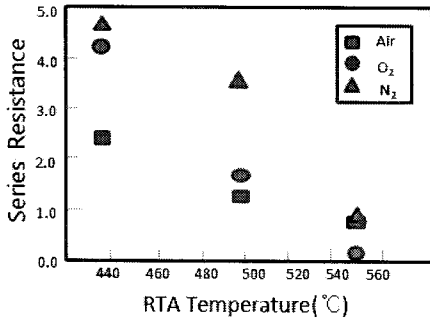
배선금속을 증착한 후 전기 전도도를 측정하였을 때 전도도의 향상을 관찰할 수 있었다. 기판온도 280°C에서 증착 후 550°C에서 열처리 된 CdTe 박막은 전처리에 따라 비저항값은 $2 \times 10^4 \Omega \text{cm}$ 정도로 일정하였으나, 박막표면의 불순물층 제거와 표면성분비 변화에 의해 접촉저항값이 감소하였으며, chromate와 hydrazine처리를 모두 한 경우 가장 낮은 값을 보이고 있다. 또한 배선금속층을 증착한 후 최종적인 전지열처리를 하게 되면 이동도가 큰 Au나 Cu가 Te과잉의 CdTe 박막계

면부분과 반응 또는 박막내부로 확산하여 p' 층인 $\text{Au}_x\text{Te}_{1-x}$, $\text{Cu}_{2x}\text{Te}_x$ 층을 형성하여 접촉저항을 감소시킬 수 있었다. 급속열처리온도에 따른 CdTe 박막의 저항값은 열처리온도가 550°C까지 증가함에 따라 CdTe 박막의 비저항이 $6 \times 10^4 \Omega \text{cm}$ 에서 $2 \times 10^4 \Omega \text{cm}$ 까지 감소하였고 450°C의 경우에는 상대적으로 큰 접촉 저항값을 보이고 있다. 이러한 비저항감소에 미치는 열처리온도 증가 효과는 열처리에 따라 결정립 크기가 성장하여 결정립계로 인해 생기는 계면결함 및 박막내에 존재하는 석출상 및 결함이 제거된 결과로 판단되며, CdCl₂처리 후 로열처리한 CdTe 박막의 비저항에 비해 낮은 저항값을 나타냈다.

[그림 14] 에서 보는 바와 같이 급속열처리 시 온도에 따른 열처리 분위기에 따른 영향을 조사하기 위하여 공기 중의 열처리와 공기 중의 두 주요성분인 산소와 질소만을 단독으로 사용한 급속 열처리를 수행하고 태양 전지를 제조하여 태양전지의 에너지변환효율(a)과 전기저항값의 차이를 비교하였다. 열처리 분위기의 경우 공기분위기하에서 보다 산소분위기의 경우 낮은 변환 효율을 보이고 있으며 질소분위기하에서는 더욱 효율이 떨어지는 것을 알 수가 있었다. 공기분위기에서 550°C급속열처리의 경우 거의 9%로 가장 높은 에너지변환 효율을 나타내었다. 저항값은 세 가지 분위기 공기, 산소, 질소의 경우 모두 열처리온도가 높을수록 감소하였는데 공기보다는 산소, 산소보다는 질소 분위기 하에서 더 급변 감소하는 것을 알 수가 있다.



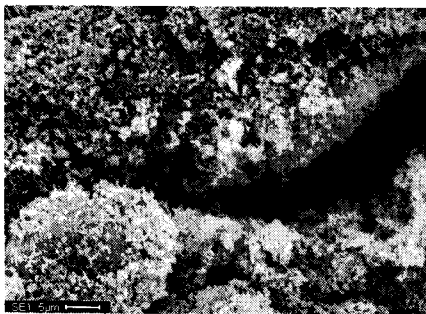
(a)



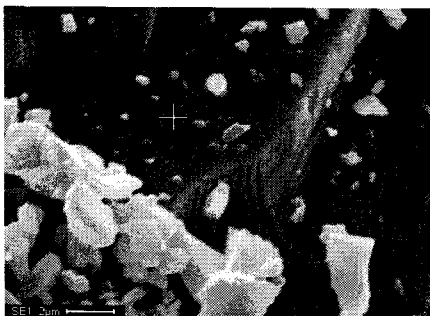
(b)

그림 14. 와이어형 금속제조법에 따른 열처리 온도변화에 대한 에너지변환효율(a), 전지저항값(b).

[그림 15] 에서 보는 바와 같이 결정립의 크기가 성장 속도에 반비례하는 결과를 얻었다. 압력이 높을 때의 결정립의 크기가 압력이 낮을 때 보다 약간 증가하였으며, 역시 소스와 기판사이의 간격을 변화 시켰을 때에도 간격이 증가할수록 결정립의 크기가 증가하였다. 실험결과 성장속도의 증가에 따라 같은 두께의 박막에서 결정립의 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.



TiO₂



CdTe

그림 15. 결정성장속도에 따른 이산화타타니움과 카드뮴 텔루라이드의 전자현미경 사진

끝으로 최적의 특성을 보이는 CdTe 제조조건인 280°C 기판온도의 550°C 공기분위기 열처리에 대해 가장 높은 에너지 변환효율을 보이는 급속열처리법 CdTe를 이용한 결과 0.07cm², 1.0cm² 면적에서 각각 12.0%, 6.0%의 최고 에너지 변환효율을 보이는 태양전지를 제조할 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서는 저가격이면서도 고효율인 무기질 박막형 태양전지를 제작하기 위하여 졸-겔 방법을 이용하여 이산화타타니움을 만들고 증착법을 이용하여 카드뮴텔루라이드를 만들어 P-N형 접합 반도체식 전극을 형성하였다. 다양한 온도의 열처리와 여러 가지의 주위분위기하에서 연구를 수행한 결과 1~9)와 같은 결과를 도출해 낼 수 있었다. 이러한 결과들은 최근 발표되고 있는 박막형 신기술의 특징과 시사점 등 제시되고 있는 태양광분야의 활성화를 위해 수행되어야 할 과제에 대한 논점이 제시될 것이다. 고효율의 태양전지를 제작하기 위해서는 전극의 형성이 매우 중요하다. 따라서 고효율 박막형 태양전지의 전극은 증착법으로 형성하는 방법을 택하였고, 이와 같이 형성하는 전극은 변환효율을 높여주는 하지만 진공장비를 사용하고, 전극 재료 자체가 매우 고가인 점을 감안하면 태양전지 제작비용을 높이는 주요 요인 중 하나라 할 수 있다. 따라서 앞으로의 연구에서는 값이 저렴하면서도 태양전지의 성능을 그대로 유지시킬 수 있는 우수한 전극 형성 방법 및 재료를 개발하는 것이 필요하다. 향후 박막형 태양전지의 에너지변환효율을 향상시키기 위하여 양성자가속기 빔을 조사하는 방법, 급속이온빔을 조사하는 방법 등을 이용하여 전지재료의 표면을 개질하여 전기적 광학적 효과를 증대시켜 효율을 높일 수 있도록 연구를 진행할 계획이다.

한편 태양광 분야에서 한국은 박막형 태양전지의 신기술 및 보급에 성공한 대표적인 사례로서 거론된다. 태양광의 에너지 자원화를 목표로 최근 10여 년간 지속적으로 국가차원의 기술개발 및 보급을 정책 사업화하여 진행시켰고 성공적인 선행 단계를 밟아 왔다. 현재

까지의 성공을 기반으로 태양광 비전을 수립하여 실현 가능한 장기 목표를 구체화하는 단계에 있다. 이에 한국 태양광 산업 및 기술개발 방향에 대한 분석을 통해 오늘 우리에게 주는 시사점을 도출하여 차세대 성장 동력 산업이 될 태양광분야의 발전을 위한 지표로 삼고자 한다.

- 1) 숙성시간 및 온도에 따라 합성된 TiO_2 의 특성은 숙성시간이 증가 할수록 101 면의 아나타제 상의 결정으로 변환됨을 확인할 수 있었다.
- 2) 숙성온도 90°C 가 45°C 에 비해 아나타제 결정 감도를 가지고 있는 TiO_2 로 합성이 가능함을 알 수 있었다. TiO_2 의 응집되지 않은 나노입자의 크기는 10-30nm의 크기로 분포하고 있음을 알 수 있었다.
- 3) 숙성시간 및 온도에 따른 TiO_2 박막의 특성은 합성시 숙성시간이 증가되면서 전류밀도의 양은 6.68 mA/cm^2 에서 12.98 mA/cm^2 로 증가되어 효율은 2.64%에서 4.88%로 증가되었다.
- 4) 숙성온도가 증가 되면 전류 밀도의 양이 16.15 mA/cm^2 에서 17.88 mA/cm^2 로 증가되어 효율은 4.88%에서 6.98%로 증가되었다.
- 5) TiO_2 의 아나타제 결정도의 증가는 전류밀도의 향상을 가져옴을 확인할 수 있었다. 즉, 합성된 TiO_2 의 아나타제 결정도의 증가는 박막형 태양전지의 효율을 상승시킨다.
- 6) CdTe 박막은 550°C 에서 열처리를 거친 후 열처리 온도를 증감시킴에 따라 재결정에 의해 우선성장 정도가 감소하고 있으며 CdTe의 산화물로 여겨지는 피크가 관찰되고 chromate와 hydrazine 처리를 거친 후에는 산화물에 의한 피크를 감소시킬 수 있었다.
- 7) 산소분위기의 경우 CdTe와 산소간의 화학적 결합 형성을 관찰 할 수 있었으며 CdTe 박막표면의 산소성분은 chromate와 hydrazine 처리 후 감소하는 것을 확인하였다.
- 8) 배선금속을 증착한 후 전기전도도를 측정하였을 때 전기전도도 값이 향상되었다.
- 9) 최적의 특성을 보이는 CdTe 제조조건에 대해 가장 높은 에너지 변환효율을 보이는 금속열처리법 CdTe를 이용한 결과 0.07 cm^2 , 1.0 cm^2 면적에서 각각

12.0%, 6.0%의 최고 에너지 변환효율을 보이는 태양전지를 제조할 수 있었다.

참고문헌

- [1] M. M. Gomez, J. Lu. E. Olsson, A. Hagfeldt, and C. G. Granqvist, "High efficiency dye-sensitized nanocrystalline solar cells based on sputter deposited Ti oxide films," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 64, pp.385-392, 2000.
- [2] Y. M. Sung, M. Otsubo, C. Honda, C. H. Park, *Jpn. J. Appl.Phys.* 41, 6563, 2002.
- [3] M. A. Contreras, K. Ramanathan, J. AbuShama, F. Hasoon, D. L. Young, B. Egaas, R. Noufi, *prog. photovoltaics: Res. Appl.* 13, 209, 2005.
- [4] N. G. Park, K. M. Kim, M. G. Kang, K. S. Ryu, S. H. Chang, and Y. J. Shin, "A Methodology for Low-Temperature Fabrication of Dye-Sensitized TiO_2 Films," *Ads. Mater.*, 17 : pp.2349-2353, 2005.
- [5] Dan Li and Younan Xia, "Fabcilation of Titania Nanofibers by Electrospinning," *Nano Lett.*, Vol.3, pp.555-560, 2003.
- [6] S. I. Park, D. Y. Lee, M. H. Lee, S. J. Lee, and B. Y. Kim, "Fabrication of Electrospun Titania Nanofiber," *Journal of the Korean Ceramic Society*, Vol.42, pp.548-553, 2005.
- [7] Jeerapong Wathanaarun, Varong Pavarajarn, Pitt Supaphol, "Titanium(IV) oxide nanofibers of combined sol-gel and electrospinning techniques : Preliminary report on effects of preparation conditions and secondary metal dopant," *Science and Technology of Advanced Materials*. Vol.6, pp.240-245, 2005.
- [8] Photovoltaic Energy Program Overview Fiscal 2000, US DOE, 2001(2).
- [9] T. Stergiopoulos, I. M. Arabatzis, and G. Katsaros, P. Falaras, "Binary Polyethylene

- Oxide/Titania Solid state Redox Electrolyte for Highly Efficient Nanocrystalline TiO_2 Photoelectrochemical Cells," *Nanoletters*, 2, pp.1259-1261, 2002.
- [10] A. F. Nogueira, J. R. Durrant, M. A. DePaoli, "Dye-sensitized nanocrystalline solar cells Employing a Polymer Electrolyte," *Adv. Mater.*, 13, pp.826-830, 2001.
- [11] 진성호, 이승준, 김성철, 정승진, 박성민, 이재욱, 재갈영순, "밴드갭이 낮은 공액고분자의 합성과 특징", 한국신재생에너지학회, 춘계학술대회논문집 pp.240, 2007.
- [12] R. D. McConnell, "Assessment of the dye-sensitized solar cell," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.6, Issue 3, pp.271-293, 2002.
- [13] Z. N. Adamian, "Investigation of solar cells with porous silicon as antireflection layer," *Solar Energy materials & Solar Cells*, 64, pp.347-351, 2000.
- [14] D. Zhang, T. Yoshida, K. Furuta, H. Minoura, J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry 164, pp.159-166, 2004.
- [15] Markus B. Schubert and Jurgen H. Werner, "Flexible Solar Cells for clothing Materials today," 9 : pp.42-50, 2006.
- [16] 서재섭 외 3인, "에너지 전환 소자용 TiO_2/CNT 하이브리드 나노섬유 전극", 한국신재생에너지학회, 춘계학술대회논문집 pp.323-325, 2007.
- [17] M. Grazel. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 8, 171, 2000.
- [18] Wang, H. : Jusys, Z. : Behm, R., *J. Phys. Chem. B*. Vol.108, No.50, pp.19413-19424, 2004.
- [19] A. H. Moharram, M. M. Hafiz, and A. Salem, *Applied Surface Science*, 172, pp.61-67, 2001.
- [20] Zhaoyue Liu, Kai Pan, Min Liu, "Influence of the binder on the electron transport in the dye-sensitized TiO_2 electrode," *Thin Solid Films*, 484, 1-2, pp.346-351, 2005.
- [21] 김미정, 서현웅, 최진영, 조재석, 김희재, "RF 스퍼터링 증착된 TiO_2 박막의 염료 감응형 태양전지의 적용연구", 한국신재생에너지학회, 춘계학술대회논문집 pp.309-312, 2007.
- [22] Supachai Ngamsinlapasathian, "Highly efficient dye-sensitized solar cell using nanocrystalline Titania containing nanotube structure," *J. of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, volume 164, Issue 1-3, pp.145-151, 2004.
- [23] Kazuharu Suzuki, "dye-sensitized solar cells with ionic gel electrolytes prepared from imidazolium salts and agaros", *Comptes Rendus Chimie*, volume 9, Issue 5-6, pp.611-616, 2006.

저자 소개

이 경 호(Kyung-Ho Lee)

정회원



- 1983년 2월 : 건국대학교 화학과 (이학사)
- 1985년 2월 : 건국대학교 분석화학(이학석사)
- 1991년 8월 : 건국대학교 수질환경센터(이학박사)

- 1992년 ~ 1995년 : 미국 Baylor University Post Doc.
- 1998년 3월 ~ 현재 : 경주대학교 환경에너지학과 교수
- 2007년 3월 ~ 2009년 2월 : 경주대학교 산업기술연구 원장
- 2009년 3월 ~ 2009년 7월 : 경주대학교 에너지특성화 사업단장

<관심분야> : 전기화학, 물질소재화학