

# 저가 고효율 실리콘계 (protocrystalline Si/ $\mu$ c-Si:H) 적층형 박막 태양전지 개발

임광수

한국과학기술원, 전자 전산학과, 전기 및 전자 전공

## 요 약

비정질 실리콘 태양전지 대신에 열화가 더 적은 프로터결정 실리콘(pc-Si:H)을 상층전지 흡수층으로 사용한 고효율 실리콘계 적층형(pc-Si:H/ $\mu$ c-Si:H) 박막 태양전지를 개발하였다. 우선, 높은 전도도와 넓은 에너지 밴드갭 특성을 갖는 p-a-SiC:H 박막을 개발하였고, p/i 계면의 특성 향상을 위해 p-nc-SiC:H 완충층을 개발하였다. 프로터결정 실리콘 다층막을 제작하고 FTIR, 평면 TEM, 단면 TEM 측정을 통해 프로터결정 실리콘 다층막의 우수한 열화 특성의 원인을 규명하였다. 적층형 태양전지의 성능향상을 위해 n-p-p 구조의 터널접합을 제안, 제작하고 특성을 분석하였으며, pc-Si:H/a-Si:H 적층형 태양전지에 적용하여 성능향상을 이루었다. 양질의 하층전지용 마이크로결정 실리콘 박막을 증착하기 위하여 광CVD법과 플라즈마CVD법을 결합한 2단계 마이크로결정 실리콘 증착법을 개발하였다.

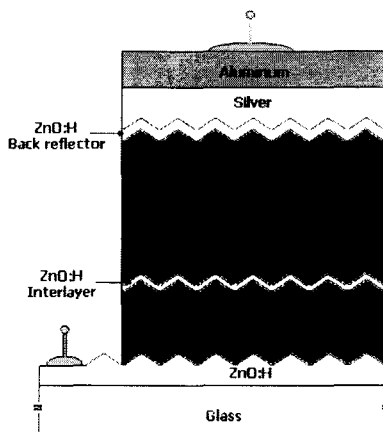
## 1. 서 론

실리콘계 박막 태양전지는 비정질 실리콘(a-Si:H) 태양전지(1세대), 비정질 실리콘(a-Si:H)/비정질 실리콘(a-Si:H) 적층형(tandem) 태양전지(2세대), 비정질 실리콘(a-Si:H)/비정질 실리콘게르마늄(a-SiGe:H) 적층형 태양전지(3세대), 비정질 실리콘(a-Si:H)/마이크로결정 실리콘( $\mu$ c-Si:H) 하이브리드 적층형 태양전지(4세대)로 기술의 발전이 이루어져 왔다.

1세대~3세대 실리콘계 박막 태양전지는 비정질 실리콘 재료가 갖는, 조사된 빛에 의해 에너지 변환효율이 감소하는 열화 현상[1]과 더불어, 낮은 에너지 변환효율, 고가의 수소화 게르마늄 가스의 사용으로 인한 제조단가의 상승 등의 문제점이 있다. 4세대 하이브리드 적층형 태양전지는 하층전지로 열화가 거의 없는 마이

크로결정 실리콘 태양전지를 사용하고, 상층전지로 얇은 두께의 비정질 실리콘 i 층(~200 nm)을 사용하여 기존의 기술에 비해 열화율을 많이 낮춘 기술이다. 하지만 이 경우에도 어느 정도 상층에서의 열화는 피할 수 없다.

본 연구에서는 이러한 4세대 태양전지의 단점을 극복하고자 비정질 실리콘 대신에 열화가 더 적은 프로터결정 실리콘(pc-Si:H)을 상층전지 흡수층으로 사용한 [그림 1]과 같은 구조의 고효율 실리콘계 적층형 박막 태양전지를 개발한다.



[그림 1 : 실리콘계 (protocrystalline Si/ $\mu$ c-Si:H) 적층형 박막 태양전지 구조]

## 2. 본 론

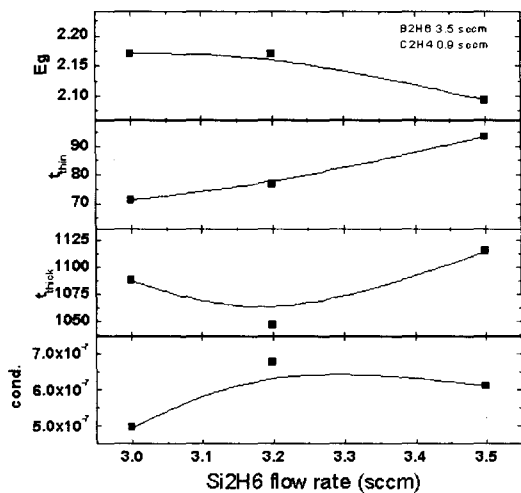
### 가. 높은 전도도와 큰 에너지 밴드갭을 갖는 p층의 개발

#### 1) p-a-SiC:H 박막 제작 및 특성 평가

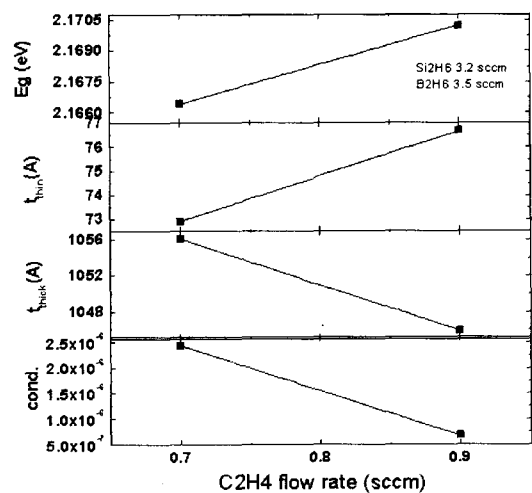
높은 효율을 갖는 태양전지를 제작하기 위해서는 높은 전기전도도와 큰 에너지 밴드갭을 갖는 p층의 개발이 필요하다. p층의 전기전도도가 낮은 경우에는 태양 전지 내부의 전계 형성이 원활하지 못하여 개방 전압과 충실도(FF)가 감소하게 되며, 작은 에너지 밴드갭을 갖는 경우에는 단파장영역의 태양광 에너지가 p층에서 흡수됨으로 인해 단락 전류가 감소하게 된다.

본 연구에서는 광CVD법을 사용하여 상층전지의 p층으로 사용하기 위한 p-a-SiC:H 박막을 개발하였다. 광CVD법은 반응가스를 분해하기 위하여 자외선(UV) 램프를 사용함으로써 일반적으로 사용되는 플라즈마CVD법과는 달리 이온 충돌에 의한 결함이 없는 양질의 박막을 얻을 수 있는 기술이다.

반응가스로는  $\text{Si}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$ 를 사용하였다. 박막 증착시의 기판 온도와 압력은 각각  $250\text{ }^\circ\text{C}$ 와  $0.46\text{ Torr}$ 로 고정하였다.  $\text{B}_2\text{H}_6$ 의 유량과  $\text{C}_2\text{H}_4$ 의 유량을 각각  $3.5\text{ sccm}$ ,  $0.9\text{ sccm}$ 으로 고정하고,  $\text{Si}_2\text{H}_6$ 의 유량을  $3.0\text{ sccm}$ 에서  $3.5\text{ sccm}$ 까지 변화시키면서 p-a-SiC:H 박막을 제작하였다. 제작된 박막의 특성을 평가하기 위하여 에너지 밴드갭과 암전도도를 측정하였으며, [그림 2]에 그 결과를 나타냈다. 일반적으로  $\text{B}_2\text{H}_6/\text{Si}_2\text{H}_6$  유량비가 증가할수록 도핑 농도가 높아짐으로 전도도가 향상되지만 결함밀도도 함께 증가하기 때문에 어느 수준이상에서는 전도도가 다시 감소하게 된다. [그림 2]에서  $\text{Si}_2\text{H}_6$ 의 유량이  $3.2\text{ sccm}$ 인 경우에  $2.0\text{ eV}$  이상의 높은 에너지 밴드갭을 갖는 p-a-SiC:H 박막을 얻을 수 있었지만 암전기전도도는  $7.0 \times 10^{-7}\text{ S/cm}$ 로 목표로 하고 있는  $1.0 \times 10^{-6}\text{ S/cm}$ 에 비해서는 낮았다. 암전도도를 향상시키기 위해  $\text{C}_2\text{H}_4$ 의 유량을  $0.9\text{ sccm}$ 에서  $0.7\text{ sccm}$ 으로 낮추었다. [그림 3]에 보인 바와 같이  $\text{C}_2\text{H}_4$ 의 유량을 감소시킴으로써 광학적 밴드갭은 약간 감소하였으나  $2.5 \times 10^{-6}\text{ S/cm}$ 의 높은 암전기전도도를 갖는 p-a-SiC:H 박막을 얻을 수 있었다.



[그림 2 :  $\text{Si}_2\text{H}_6$  유량에 따른 p-a-SiC:H 박막의 특성 변화]



[그림 3 :  $\text{C}_2\text{H}_4$  유량에 따른 p-a-SiC:H 박막의 특성 변화]

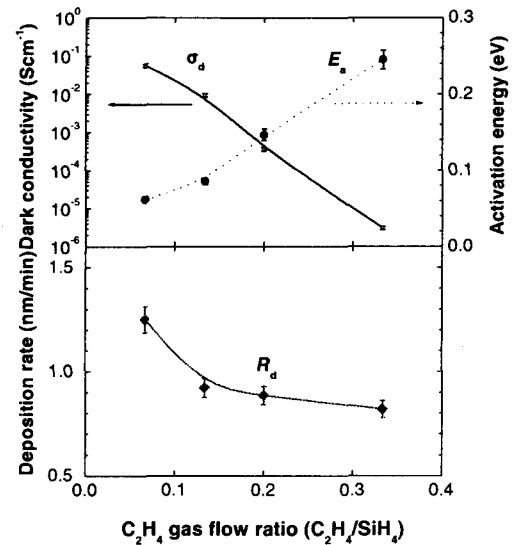
## 2) p/i 계면 개선 연구

p층과 i층의 계면에는 두 층간의 에너지 밴드갭 차이로 인해 많은 결함이 존재한다. 이 결함들은 빛에 의해 생성된 전자와 정공의 재결합을 유도함으로써 단파장 영역의 수집효율을 감소시키는 역할을 한다.

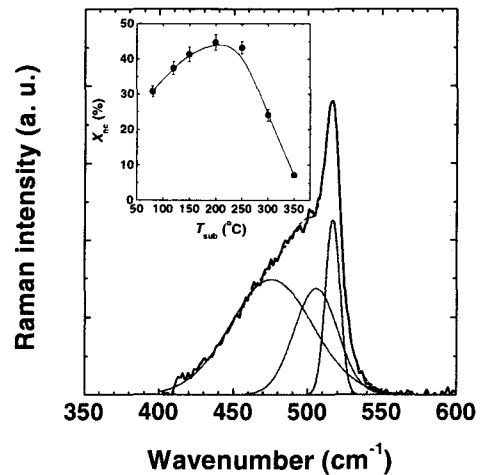
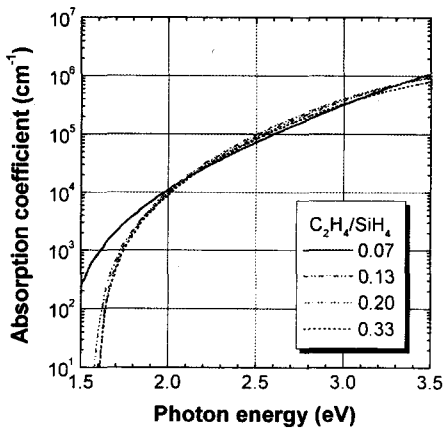
본 연구에서는 p/i계면을 개선함으로써 태양전지의 성능을 향상시키기 위하여 p-나노결정 실리콘카바이드(p-nc-SiC:H) 완충층(buffer layer)을 개발하였다.

p-nc-SiC:H 박막은 증착시에 수소를 첨가하여 비정질 실리콘카바이드 조직 내부에 실리콘 나노결정을 형성한 박막으로, 이 박막을 p/i 계면에 완충층으로 사용함으로써 자연 수소처리에 효과에 의해 p층의 결함을 감소시키고 내부전계를 향상시킴으로써 전체적으로 태양전지의 성능 향상을 가져오게 된다.

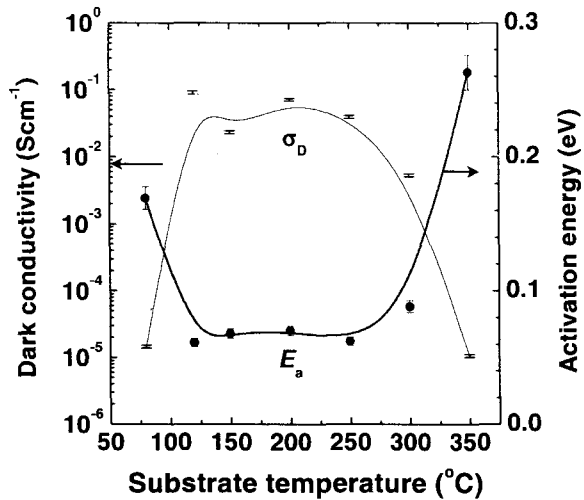
p-nc-SiC:H 박막을 증착하기 위하여  $\text{Si}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$  그리고  $\text{H}_2$ 를 반응가스로 사용하였으며  $\text{B}_2\text{H}_6$  도핑농도,  $\text{C}_2\text{H}_4$  유량변화, 기판온도, 수은조 온도 변화에 따른 박막의 특성을 분석하였다. [그림 4]~[그림 9]는 그 결과를 나타낸 것이다.



[그림 4 : 붕소 도핑 농도에 대한 p-nc-SiC:H 박막의  $E_{04}$  광학적 밴드갭의 변화] [그림 5 : 에틸렌가스 유량비에 대한 p-nc-SiC:H 박막의 전기적 특성 및 증착속도의 변화]



[그림 6 : 에틸렌 가스 유량비에 대한 p-nc-SiC:H 박막의 흡수계수 변화] [그림 7 : 기판온도 250 °C에서 증착된 p-nc-SiC:H 박막의 라만 스펙트럼 및 기판온도에 따른 p-nc-SiC:H 박막의 결정체적분율 변화]



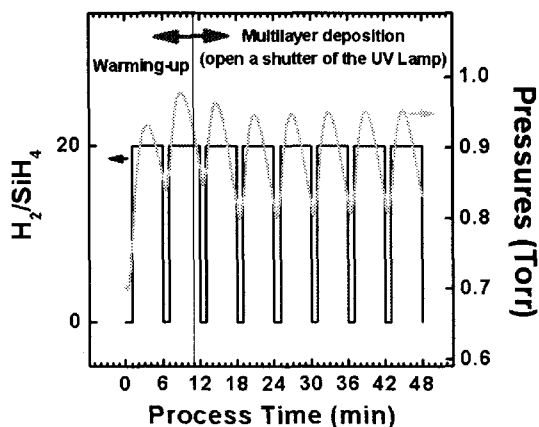
[그림 8 : 기판온도에 따른  $p\text{-nc-SiC:H}$  박막의 전기적 특성 변화]

[그림 9 : 수은조 온도에 대한  $p\text{-nc-SiC:H}$  박막의 결정체적분율의 변화 (라만스펙트럼:수은조 온도 50 °C)]

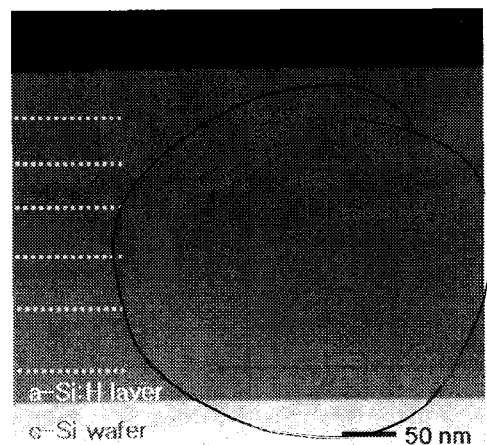
### 나. 저열화 프로터결정 실리콘 다층막 태양전지 개발

#### 1) 프로터결정 실리콘 다층막의 제작

프로터결정 실리콘 다층막은 반응가스 유량조절기(MFC)를 컴퓨터를 이용하여 조정하여 주기적으로 수소 희석비를 바꾸어 가며 증착한 수소 희석부층(sublayer)과 비수소 희석부층으로 이루어진다. [그림 10]은 공정 시간에 따른 수소희석비의 변화와 그에 따른 반응실 내부의 공정 압력 변화를 나타낸 것이다. [그림 11]은 이와 같은 방법으로 6회 증착한 다층막의 단면 TEM 사진이다. 그림에서 알 수 있듯이 다층막 형태의 구조로 이루어져있음을 알 수 있다.



[그림 10 : 프로터결정 실리콘 증착 시의 수소 유량 변화와 반응실내의 압력변화]



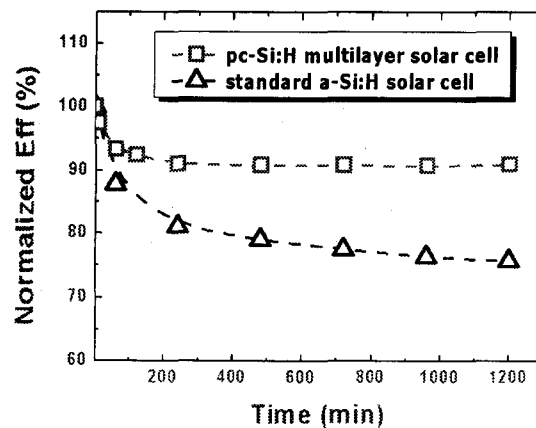
[그림 11 : 6회 증착한 프로터결정 실리콘 박막의 단면 TEM 이미지]

## 2) 프로터결정 실리콘 다층막의 특성과 물리적 이해

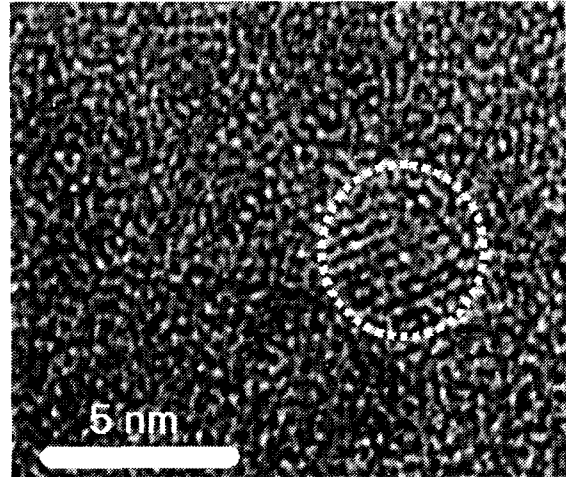
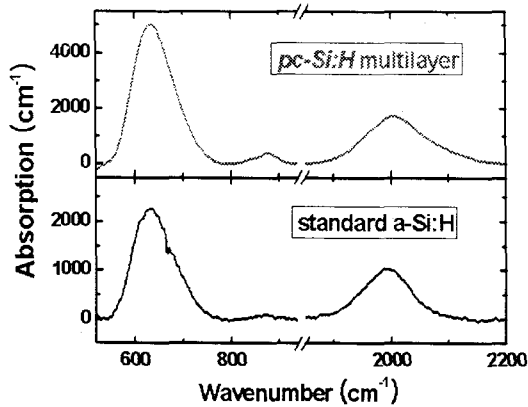
[그림 12]는 일반 비정질 실리콘 태양전지와 프로터결정 실리콘 다층막 태양전지의 빛 조사 시간에 따른 열화 특성을 측정한 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 프로터결정 실리콘 다층막을 광흡수층으로 사용한 태양전지는 일반적인 비정질 실리콘 태양전지에 매우 적은 열화율을 가지면서도 빠른 시간내에 안정화가 이루어지는 특징을 가지고 있다.

이러한 프로터결정 실리콘 다층막의 우수한 열화 특성의 원인을 알아내기 위하여 FTIR을 측정 분석하였다. [그림 13]은 프로터결정 실리콘 다층막과 일반적인 비정질 실리콘 태양전지의 FTIR 측정 결과이다. 프로터결정 실리콘 다층막의 경우 비정질 실리콘 박막과는 달리 뭉친(clustered) Si-H<sub>2</sub> 결합상태를 나타내는 2100 cm<sup>-1</sup>에서의 신축 모드(stretching mode)가 나타남을 확인할 수 있다.[2] 이러한 특성은 일반적으로 박막 내에 매우 작은 실리콘 결정이 존재하는 경우에 나타나는 것으로 보고되고 있다. 이로부터 프로터결정 실리콘 다층막 안에 매우 작은 크기의 나노결정이 존재함을 유추할 수 있다. 보다 직접적으로 나노결정의 존재를 확인하기 위하여 프로터결정 실리콘 다층막의 평면 TEM을 측정하였으며 그 결과인 [그림 14]로부터 나노결정의 존재를 다시 한 번 확인할 수 있다.

비정질 실리콘 태양전지의 열화가 일어나는 원인으로서는 현재 여러 가지 모델이 보고되고 있지만 일반적으로 빛 조사로 생성된 전자-정공이 재결합하며 방사하는 에너지에 의해 약한 Si-Si 결합이 깨어짐으로 인해 일어나는 것으로 받아들여지고 있다[3]. 프로터결정 실리콘 다층막의 경우 이러한 재결합이 박막내에 존재하는 나노결정 내에서 주로 이루어짐으로써 약한 Si-Si 결합이 깨어지는 확률을 낮추어 우수한 열화 특성을 갖는 것으로 생각된다.



[그림 12 : 프로터결정 실리콘 태양전지와 일반 비정질 실리콘 태양전지의 열화특성 비교]



[그림 13 : 프로터결정 실리콘 박막과 비정질 실리콘 박막의 FTIR 측정 결과]

[그림 14 : 프로터결정 실리콘 박막의 단면 TEM 이미지, 둥근 원은 Si 나노결정]

#### 다. 적층형 태양전지를 위한 터널접합의 개발

##### 1) n-p-p 구조 터널접합의 제작

터널접합이란 적층형 태양전지에서 상층전지와 하층 전지를 연결하는 부분으로 기본적으로는 n/p층으로 구성이 된다. 적층형 태양전지는 기본적으로 직렬 연결된 두 개의 태양전지로 이루어져 있기 때문에 상층 태양전지에 흐르는 전류와 하층 태양전지에 흐르는 전류가 같아야 한다. 이를 위해서 적층형 태양전지 내부에서는 상층 태양전지에서 생성된 전자와 하층 태양전지에서 생성된 정공이 상, 하층 전지의 접합부에서 끊임없이 재결합이 이루어 져야한다. 만약, 이러한 전자와 정공의 재결합 과정이 원활히 이루어지지 않으면 재결합되지 않은 전자나 정공이 태양전지 내부의 결함 준위에 포획(trap)됨으로 인해 내부 전계가 왜곡되고 결과적으로 태양전지의 성능이 저하되게 된다. 따라서 높은 에너지 변화효율을 갖는 태양전지를 제작하기 위해서는 먼저 효율적인 재결합이 이루어지는 터널접합에 대한 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 효율적인 재결합이 이루어지는 터널접합 구조로 n/p층 사이에 얇은 p-a-Si:H 박막을 삽입한 n- $\mu$ c-Si:H/p-a-Si:H/p-a-SiC:H 구조의 터널접합을 제안하고 제작하였다. 모든 박막은 광CVD법을 이용하여 증착하였으며, 적층형 태양전지에 적용하기에 앞서 터널접합만의 특성을 평가하기 위하여 glass/SnO:F/n- $\mu$

c-Si:H/p-a-Si:H/p-a-SiC:H/Al 구조의 터널접합을 제작하였다. n- $\mu$ c-Si:H 박막은 SiH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, PH<sub>3</sub>의 반응가스를 사용하여 공정압력 0.798 Torr, 기판온도 250 °C, 수은조 온도 20 °C에서 증착하였다. p-a-SiC:H 박막은 Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>의 반응가스를 사용하여 공정압력 0.46 Torr, 기판온도 250 °C에서 증착하였다. p-a-Si:H 삽입층은 Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>의 반응가스를 사용하여 공정압력 0.46 Torr, 기판온도 250 °C에서 증착하였으며 가장 좋은 터널접합 특성을 나타내는 최적 두께를 알아내기 위하여 증착시간을 0~50초까지 변화 시켰다. 타원분광 편광 측정기를 이용하여 측정된 20, 30, 50초 증착한 p-a-Si:H 삽입층의 두께는 각각 54.1, 71.5, 78.6 Å였다.

## 2) n-p-p 구조 터널접합의 특성 분석

제작된 n-p-p 구조 터널접합의 특성을 분석하기 위하여 전압에 따른 정규저항 특성, 온도변화에 따른 암전기전도도, 활성화 에너지를 측정하였다. [그림 15]~[그림 17]은 그 결과를 나타낸 것이다.

[그림 15]는 p-a-Si:H 삽입층의 두께가 0, 20, 30, 50초 일 때 전압에 따른 정규저항을 측정한 것으로, 터널접합의 non-ohmic 특성을 나타내는 것이다. 터널접합이 이상적으로 완전한 저항에 가까울수록 즉, 전압에 관계없이 일정한 저항값을 나타내는 경우에 수평선의 형태를 갖게 된다. p-a-Si:H 삽입층을 30초 증착한 경우에 가장 우수한 특성을 얻을 수 있었다.

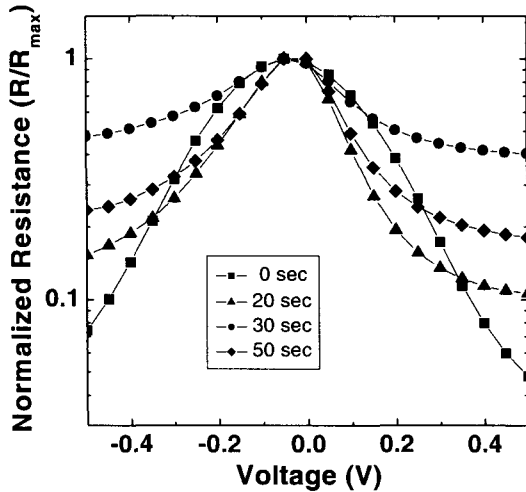
[그림 16]은 온도변화에 따라 암전기전도도를 측정한 것이다. p-a-Si:H 박막을 삽입한 경우에 단순한 n/p 구조의 터널접합에 비해 거의 100 배정도 암전기전도도의 향상이 있음을 관찰할 수 있으며, 역시 p-a-Si:H 삽입층을 30초 증착한 경우에 가장 높은 암전기전도도를 얻을 수 있었다.

[그림 17]은 [그림 16]으로부터 얻어낸 활성화 에너지를 나타낸 것으로 전자나 전공이 터널접합을 지날 때 느끼는 장벽 에너지와 관련된 값이다. p-a-Si:H 삽입층을 30초 증착한 경우에 0.12 eV의 활성화 에너지를 나타냈으며, 이 값은 p-a-Si:H 삽입층을 전혀 증착하지 않은 경우의 활성화 에너지의 거의 절반에 가까운 값이다.

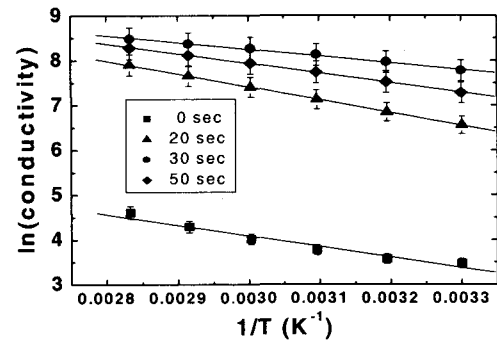
얇은 p-a-Si:H 층을 삽입함으로써 터널접합의 특성이 향상되는 원인으로 다음과 같은 두 가지를 생각해 볼 수 있다. 첫째, p-a-Si:H층의 경우 탄소 원자를 첨가하지 않음으로 p-a-SiC:H 박막보다 높은 전기 전도도를 갖는다. 전기 전도도가 높다는 것은 다시 말해서 상층 태양전지와 재결합하기 위한 더 많은 양의 정공을 공



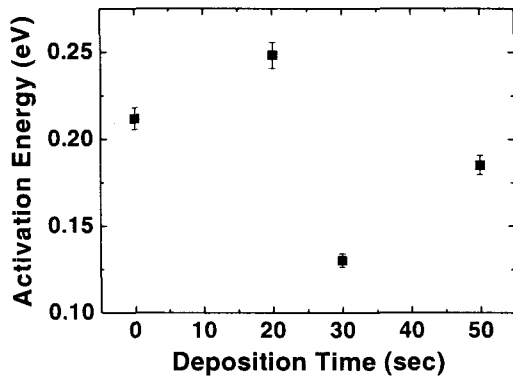
급할 수 있다는 의미이다[4]. 둘째, [그림 18]에 보인 바와 같이 타원 편광 측정법으로 측정한 p-a-Si:H의 에너지 밴드갭은 1.83 eV로 p-a-SiC:H의 에너지 밴드갭 2.14 eV 보다 약 0.3 eV가 작다. 이러한 에너지 밴드갭 차이는 p-a-Si:H 박막과 p-a-SiC:H 박막의 전도대(valence band)에 에너지의 기울어짐을 유발해 하층전지에서 생성된 정공이 상층전지 쪽으로 더 잘 전달되도록 하는 역할을 한다[5].



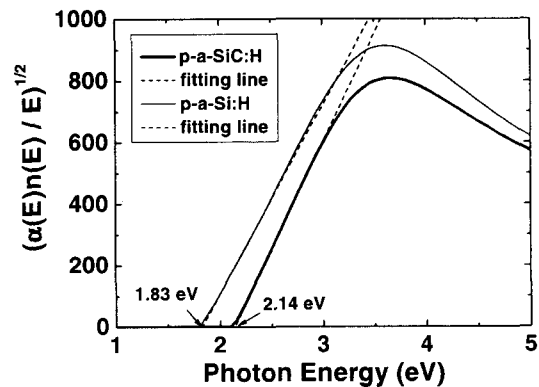
[그림 15] p-a-Si:H 삼입층 두께에 따른 터널접합의 전압-정규저항 특성



[그림 16] p-a-Si:H 삼입층 두께에 따른 터널접합의 온도-암전기전도도 특성



[그림 17] p-a-Si:H 삼입층 두께에 따른 터널접합의 활성화 에너지 특성

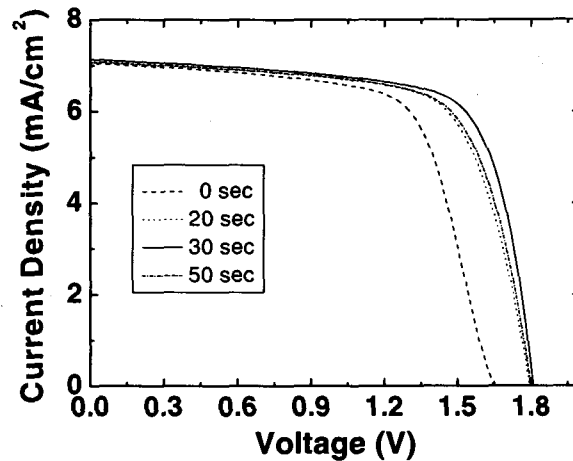


[그림 18] p-a-Si:H 박막과 p-a-SiC:H 박막의 에너지 밴드갭 특성

### 3) n-p-p 구조 터널접합을 이용한 태양전지의 성능 향상

앞서 제작한 n-p-p 구조 터널접합을 적층형 태양전지에 적용하여 실제 태양전지의 성능향상에 미치는 영향을 연구하였다. 적층형 태양전지의 상층으로는 저열화를 위해 프로터결정 다층막을 2회 증착하였으며 하층 태양전지로는 비정질 실

리콘 태양전지를 사용하였다. [그림 19]는 p-a-Si:H 삽입층의 증착시간을 0~50초 까지 변화시킨 터널접합을 적용한 태양전지의 AM1.5 빛 조사시의 I-V 특성을 나타낸 그림이다. p-a-Si:H 삽입층을 30초 증착한 터널접합을 태양전지에 적용함으로써 태양전지의 효율을 7.84 % ( $V_{oc} = 1.65$  V,  $J_{sc} = 7.06$  mA/cm<sup>2</sup>, FF=0.674) 에서 9.24 % ( $V_{oc} = 1.81$  V,  $J_{sc} = 7.13$  mA/cm<sup>2</sup>, FF = 0.715)로 향상시켰다.



[그림 19 : ] p-a-Si:H 삽입층 두께에 따른 pc-Si:H/a-Si:H 적층형 태양전지의 I-V 특성 (AM1.5, 조사)

## 라. 플라즈마CVD를 이용한 하층전지용 마이크로결정 실리콘 박막 개발

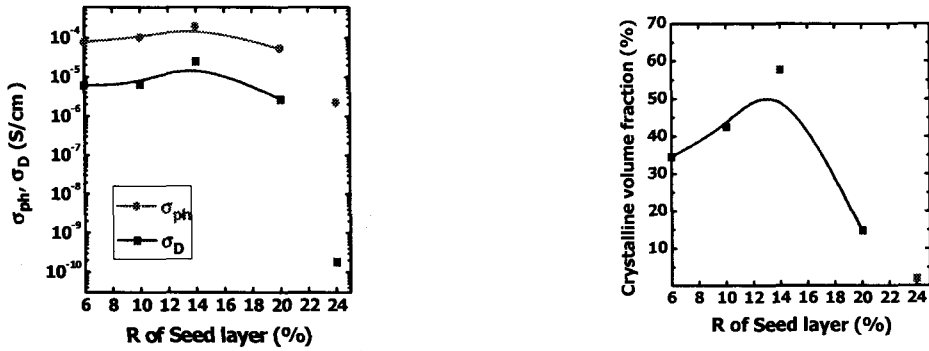
### 1) 2단계 공정을 이용한 하층전지용 i- $\mu$ c-Si:H 박막의 제작 및 특성 평가

광CVD법은 우수한 결정핵 생성 특성으로 인해 플라즈마CVD법에 비해 낮은 수소 회석비에서도 이온 충돌로 인한 결함이 없는 우수한 마이크로결정을 생성할 수 있지만 낮은 증착률로 인해 두꺼운 마이크로결정 박막을 증착하는 데는 적합하지 않다. 플라즈마CVD법은 빠른 증착속도의 장점을 가지고 있지만 결정핵 생성을 하기 위해서는 높은 수소 회석비가 필요하고 이온 충돌로 인해 양질의 결정핵을 얻기 힘들다는 단점이 있다.

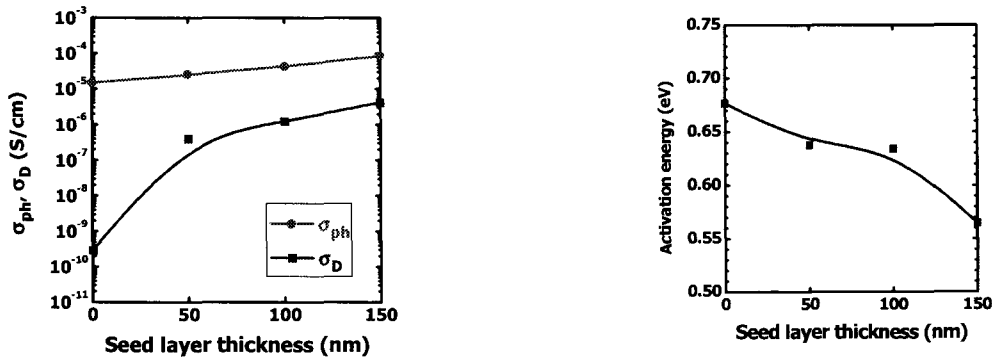
본 연구에서는 광CVD의 우수한 결정핵 생성 특성과 플라즈마CVD법의 빠른 증착 특성을 결합하여 1단계 공정에서 광CVD로 결정 씨앗층(seed layer)를 증착한 후 2단계 공정에서 플라즈마CVD의 빠른 증착 특성을 이용하여 i- $\mu$ c-Si:H 박막을 제작하였다.

광CVD를 이용한 1단계에서는 증착압력, 수은조 온도, 기판온도를 각각 0.5 Torr, 20 °C, 250 °C로 고정하고 SiH<sub>4</sub>/(SiH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>) 유량비를 6~20%로 변화시키면서

결정 씨앗층을 증착하였다. 플라즈마CVD를 이용한 2단계에서는 증착압력(0.5 ~ 1 Torr), 기판온도 250 °C, RF 파워 30 W, RF 주파수 13.56 MHz 조건에서 SiH<sub>4</sub>/(SiH<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>) 유량비를 3~4%로 변화시키면서 i- $\mu$ c-Si:H 박막을 증착하였다. [그림 20]~[그림 23]은 그 결과를 나타낸 것이다.



[그림 20] 씨앗층의 실란 수소 희석비에 따른 광, 압전도도 [그림 21] 씨앗층의 실란 수소 희석비에 따른 결정화 분율



[그림 22] 씨앗층 두께에 따른 광, 압전도도

### 3. 결 론

본 연구에서는 상층전지로 비정질 실리콘 태양전지 대신에 열화가 더 적은 프로터결정 실리콘(pc-Si:H)을 상층전지 흡수층으로 사용한 고효율 실리콘계 (pc-Si:H/ $\mu$ c-Si:H) 적층형 박막 태양전지를 개발하였다. 이를 위하여  $2.5 \times 10^{-6}$  S/cm의 높은 전도도와 2.0 eV 이상의 넓은 에너지 밴드갭 특성을 갖는 p-a-SiC:H 박막을 개발하고, p/i 계면의 특성 향상을 위한 p-nc-SiC:H 박막을 개발하였다. 프로터 결정 실리콘 다층막을 제작하고 FTIR, 평면 TEM, 단면 TEM 측정을 통해 프로터 결정 실리콘 다층막의 우수한 열화 특성의 원인이 박막 내부에 존재하는

실리콘 나노결정 때문임을 규명하였다. 적층형 태양전지의 성능향상을 위해 n-p-p 구조의 터널접합을 제안, 제작하고 특성을 분석하였으며, pc-Si:H/a-Si:H 적층형 태양전지에 적용하여 에너지 변환효율을 7.24%에서 9.24%로 향상시켰다. 양질의 하층전지용 마이크로결정 실리콘 박막을 증착하기 위하여 광CVD법과 플라즈마 CVD법을 결합한 2단계 마이크로결정 실리콘 증착법을 개발하였다.

### 참 고 문 헌

1. D. L. Staebler and C. R. Wronski, Appl. Phys. Lett. 31 (1977) 292
2. M. H. Brodsky, M. Cardona and J. J. Cuomo, Phys. Rev. B 16 (1977) 3556
3. T. Kamei, P. Stradins and A. Matsuda, Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 1707
4. S. S. Hegedus, F. Kampas, J. Xi, Apply. Phys. Lett. 67 (1995) 813.
5. J. Y. Hou, thesis in Engineering Science and Mechanics, The Pennsylvania State Univ. (1993)