

비정질 p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si 박막 태양전지에서 i-SiC 완충층의 역할

김현철 · 신혁재 · 이재신
울산대학교 재료금속공학부

Roles of i-SiC Buffer Layer in Amorphous p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si Thin Film Solar Cells

Hyun Chul Kim, Hyuck Jae Shin and Jae Shin Lee

School of Materials and Metallurgical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749

(1999년 9월 8일 받음, 1999년 10월 7일 최종수정본 받음)

초 록 플라즈마 화학증착(PECVD) 장비를 이용하여 SnO₂ 투명전도막이 피막된 유리기판 위에 p-SiC/i-Si/n-Si 이중접합 태양전지를 제작하였다. p-SiC 층의 증착중에 기체조성 $x = \text{CH}_4 / (\text{SiH}_4 + \text{CH}_4)$ 의 변화에 대한 태양전지의 광기전 특성을 관찰하였다. 기체조성(x)이 0~0.4의 범위에서 p-SiC 층의 광학적 밴드갭의 증가로 인하여 태양전지의 효율은 증가하였으나, 그 이상의 기체조성에서는 p-SiC/i-Si 계면에서의 조성불일치가 증가하여 태양전지의 효율이 감소하였다. 이러한 계면문제는 p-SiC 층과 i-Si 층 사이에 i-SiC 완충층을 삽입함으로써 크게 감소하였다. 그 결과 유효면적이 1cm²인 glass/SnO₂/p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si/Ag 구조의 박막 태양전지는 100mW/cm² 조도 하에서 8.6%의 효율을 나타내었다. ($V_{oc} = 0.85\text{V}$, $J_{sc} = 16.42\text{mA/cm}^2$, $FF = 0.615$)

Abstract Thin film solar cells on a glass/SnO₂ substrate with p-SiC/i-Si/n-Si heterojunction structures were fabricated using a plasma-enhanced chemical-vapor deposition system. The photovoltaic properties of the solar cells were examined with varying the gas phase composition, $x = \text{CH}_4 / (\text{SiH}_4 + \text{CH}_4)$, during the deposition of the p-SiC layer. In the range of $x = 0 \sim 0.4$, the efficiency of solar cell increased because of the increased band gap of the p-SiC window layer. Further increase in the gas phase composition, however, led to a decrease in the cell efficiency probably due to the increased composition mismatch at the p-SiC/i-Si interface. The interface problem was considerably reduced by introducing an i-SiC buffer layer between the p-SiC and i-Si layers. As a result, the efficiency of a glass/SnO₂/p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si/Ag thin film solar cell with 1cm² area was 8.6% ($V_{oc} = 0.85\text{V}$, $J_{sc} = 16.42\text{mA/cm}^2$, and $FF = 0.615$) under 100mW/cm² light intensity.

1. 서 론

최근 환경오염이 심각해지면서 청정에너지원으로서 태양 에너지에 대한 관심이 고조되고 있다. 수소화된 비정질 실리콘(a-Si:H) 박막 태양전지는 대면적화와 대량생산에 적합하고, 저가격화 및 유리기판 위에 제조할 수 있는 장점을 가지고 있어서 지상용 대체에너지원으로서 각광을 받고 있다.^{1~4)} 그럼에도 불구하고 비정질 실리콘 박막 태양전지가 지상용 대체에너지원으로 사용되기 위해서는 비정질 재료의 사용으로 인한 신뢰성 문제와 낮은 변환효율, 장시간 사용시 특성이 열화되는 문제와 같은 해결해야 할 문제점들을 가지고 있다.^{1,2)} 한편 수소화된 비정질 탄화실리콘(a-SiC:H) 박막은 a-Si:H 박막의 증착중에 CH₄ 기체를 추가로 공급하여 증착이 가능하고, 증착중에 가스농도비를 조절하면 광학적 밴드갭을 제어할 수 있는 것으로 알려졌다.^{5,6)} a-SiC:H 박막의 광학적 밴드갭은 박막내의 탄소 농도가 증가함에 따라 증가하기 때문에 p-SiC 박막을 a-Si:H 박막 태양전지의 창층재료로 이용한 p-SiC/i-Si/n-Si 박막 태양전지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{7~12)}

Lim 등¹⁰⁾은 SiC 창층의 두께가 p-SiC/i-Si/n-Si 박막 태양전지의 특성에 미치는 영향을 보고하였으나, SiC의 조성 에 대해서는 언급하지 않았다. Kim 등¹¹⁾은 p-SiC/i-Si/n-Si 박막 태양전지에서 p-SiC/i-Si 계면의 조성 불연속에 의한 광수집 효율에서 상당한 손실이 발생하는 문제가 있다고 지적하였으며, Tasaki 등¹²⁾은 후속적으로 p/i 계면의 국부준위가 태양전지의 효율에 크게 영향을 줌을 이론적으로 계산하였다. 이상과 같은 배경에서 SiC 박막의 조성이 p-SiC/i-Si/n-Si 다중접합 구조의 비정질 박막 태양전지 특성에 미치는 영향을 체계적으로 연구할 필요가 있다. 본 연구에서는 투명전도막이 도포된 유리기판 위에 플라즈마 화학증착(PECVD : plasma enhanced chemical vapor deposition) 법으로 비정질 탄화실리콘 및 실리콘 박막을 연속적으로 증착하여 glass/SnO₂/p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si 구조의 박막 태양전지를 제작하였다. 특히, 본 연구에서는 PECVD 공정중에서 CH₄와 SiH₄의 유량비를 조절함으로써 p-SiC와 i-SiC의 조성이 태양전지의 전기적 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

Table 1. Deposition conditions for a-SiC:H and a-Si:H films.

Layer	p-SiC	i-SiC	i-Si	n-Si
Flow rate (sccm)	SiH ₄ :12 CH ₄ :0~48 B ₂ H ₆ :0.1 H ₂ :120	SiH ₄ :12 CH ₄ :0~8 H ₂ :120	SiH ₄ :12 H ₂ :120	SiH ₄ :12 PH ₃ :0.12 H ₂ :120
Substrate temperature (°C)	200	200	200	200
RF power density (mW/cm ²)	220	220	220	220
Chamber pressure(Pa)	79	79	79	79
Film thickness(nm)	20	5	500	25

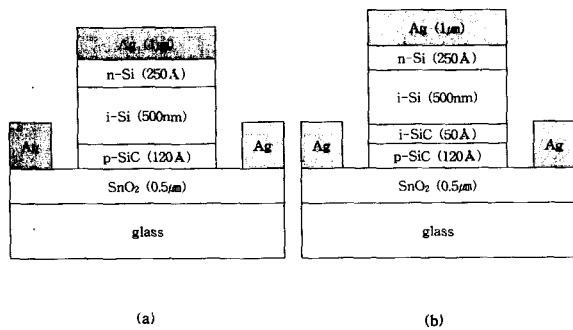


Fig. 1. Schematic of thin film solar cells (a) without and (b) with an i-SiC buffer layer.

2. 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 2가지 종류의 태양전지를 제작하였다. 첫 번째 구조는 p-SiC 박막을 창층으로 이용한 glass/SnO₂/p-SiC/i-Si/n-Si/Ag의 다층구조이고, 두 번째는 첫 번째 구조에서 p-SiC와 i-Si층 사이에 i-SiC를 완충층으로 삽입한 구조이다. 일반적인 capacitor 구조의 대향전극을 가진 rf-PECVD 장비를 이용하여 비정질 탄화실리콘과 실리콘 박막을 SnO₂가 도포된 유리기판 위에 증착하였다. 초기진공을 1.3×10⁻⁵ Pa로 하였으며, 5N 순도의 Ar 기체를 이용하여 purging을 한 다음 단일용기(single chamber)에서 p-i-n 순으로 비정질 박막을 형성하였다. 기체원(source gas)은 H₂로 희석된 20% SiH₄, 0.5% B₂H₆, 0.1%의 PH₃와 순수한 CH₄를 각각 사용하였으며, 자세한 증착조건은 Table 1에 정리하여 나타내었다. 본 연구에서는 p-SiC와 i-SiC 증착시 SiH₄와 CH₄의 기체유량을 조절하여 박막의 조성을 제어하였으며, 앞으로 기체조성 비인 CH₄/(SiH₄+CH₄)를 편의상 x로 정의하여 기술하겠다. 제작된 pin 접합부분과 접합양측에 금속 차폐마스크를 이용하여 Ag 박막을 스퍼터링 방법으로 증착하여 전극으로 이용하였다. 이와 같이 제작된 태양전지의 유효면적은 30×3.4 mm²였다. 태양전지의 암상태의 전류-전압 특성은 Keithley 2400 Sourcemeter와 Keithley 6512 electrometer를 이용하여 측정하였으며, 단결정 태양전지로 보정된 100mW/cm²(AM 1) 조도의 Na-lamp하에서 광상태 전류-전압 특성을 측정하여 태양전지의 광전 변환효율

을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. Glass/SnO₂/p-SiC/i-Si/n-Si/Ag 태양전지의 특성

Fig. 2에 p-SiC/i-Si/n-Si의 박막 태양전지에서 창층재료로 사용된 B-doped 비정질 탄화실리콘(a-SiC:H) 박막의 x에 대한 암상태에서의 전류-전압 특성을 나타내었다. 직렬저항(R_s)와 누설저항(R_{sh})를 고려할 경우 다이오드의 전류-전압 특성은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.⁷⁾

$$J = J_0 \left(\exp \frac{q(V - J R_s)}{nkT} - 1 \right) + \frac{V - J R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

J₀는 역포화전류밀도, n은 다이오드 이상지수, k는 Boltzmann 상수이고, V는 인가된 전압을 나타낸다. 위의 식을 이용하여 Fig. 2로부터 n, J₀, R_s를 구하여 Table 2에 나타내었다. 창층인 p-SiC 증착시 기체조성 x가 0에서 0.8로 변함에 따라 n은 1.51에서 1.87로 증가하였으며, J₀는 x가 0.2일 때 1.08×10⁻¹¹A/cm²의 최소값을 나타내었다. 일반적으로 n은 1과 2사이 값을 가지며, 전류수송기에 의해 그 값이 변한다고 알려져 있다.¹⁴⁾ 전류수송에 있어서 확산전류(diffusion currents)가 주된 기구이면 n은 1에 가까워지고, 금지대역내에 존재하는 국부준위(localized states)를 이용한 재결합 전류(recombination currents)가 주된 기구이면 n은 2에 가까워진다. 따라서, 본 연구에서 얻은 태양전지들의 n은 1.51~1.87의 범위이므로 재결합 전류가 전류수송의 주된 원인으로 생각할 수 있다. 또한 p-SiC 박막 증착시 x가 증가함에 따라 n이 증가하는 경향을 나타내었는데 이는 재결합 중심으로 작용하는 금지대역의 국부준위밀도가 증가함을 의미한다. p-SiC/i-Si/n-Si 이중접합의 경우 Fig. 3과 같이 조성단차에 의해 에너지대 구조에서 불연속이 발생되고, 단결정 실리콘의 이중접합에서 관찰되는 격자불일치와 유사하게 p-SiC/i-Si 계면에 많은 결함을 생성시킨다고 알려져 있다.¹⁾ 한편 Table 2에서 x가 0에서 0.8로 증가함에 따라 직렬저항은 3.5에서 38.3Ωcm²로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 직렬저항은 일반적으로 소자의 내부저항과 접촉저항에 의존한다.¹⁴⁾ p-SiC 증착시 x가 증가함에 따라 박막내의 탄소농도는 증가하고,

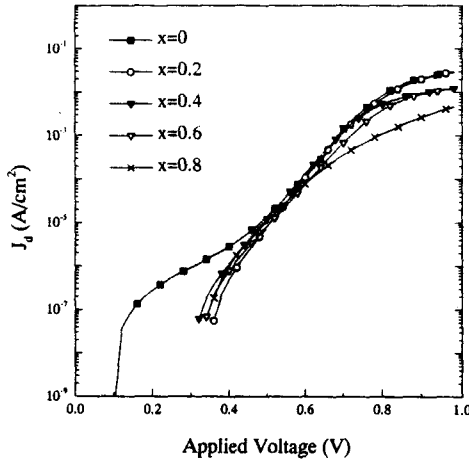


Fig. 2. Dark state J-V characteristics of glass/SnO₂/p-SiC/i-Si/n-Si/Ag thin film solar cells. The gas phase composition, x = CH₄/(SiH₄+CH₄), was varied during deposition of the p-SiC layer.

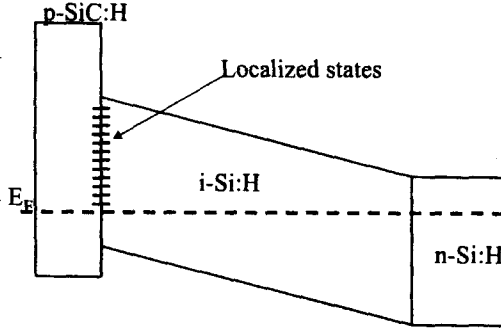


Fig. 3. Energy band diagram of a p-SiC/i-Si/n-Si heterojunction.

p-SiC 박막의 전기비저항 또한 증가한다. 따라서, x의 증가에 따른 R_s의 증가는 p-SiC 박막의 내부저항의 증가와 더불어 p-SiC/i-Si 계면에서의 조성불일치에 의한 접촉저항의 증가에 기인하는 것으로 사료된다.

Fig. 4에 Glass/SnO₂/p-SiC/i-Si/n-Si/Ag 태양전지의 광상태 전류-전압 특성을 나타내었다. 이 결과로부터 태양전지의 변수인 J_{sc}, V_{oc}, FF, 효율을 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 창층으로 p-Si를 증착한 경우 (x=0)에 J_{sc}, V_{oc}, FF는 각각 11.74mA/cm², 0.77V, 0.653였고 효율은 5.9%를 나타내었다. 그러나, 창층으로 p-SiC를 이용한 경우 x가 증가함에 따라 태양전지의 효율은 증가하여 x=0.4일 때 6.6%로 최대값을 나타낸 후 감소하였다. 이와 같은 경향은 다음의 두가지 영역으로 나누어 논의할 수 있다. 첫째, x=0~0.4의 범위에서 효율이 증가하는 이유는 J_{sc}, V_{oc}가 증가하기 때문임을 Fig. 5에서 알 수 있다. J_{sc}의 증가는 x가 증가함에 따라 창층인 p-SiC의 광학적 밴드갭이 증가하는 것에 기인한다. 본 연구에서도 x=0에서 0.8로 증가함에 따라 광학적 밴드갭은 1.78eV에서 2.32eV로 계속 증가하였다. 즉, 창층의 보다 넓은 광학적 밴드갭으로 인해 광을 주로 흡수하는 i-Si 층에 도달하는 광자의 수는 증가할 것이고 이에 따라 광전류 (photocurrent) 또한 증가

하게 된다. V_{oc}는 광기전압을 의미하며, 접합의 에너지 장벽높이 (barrier height)에 비례하는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾ p-SiC/i-Si의 장벽높이는 SiC의 밴드갭이 증가할수록 증가하게 된다. p-Si/i-Si/n-Si의 동종접합보다 p-SiC/i-Si/n-Si의 이종접합의 경우 V_{oc}가 보다 큰 경향을 나타낸다고 잘 알려져 있다.¹⁵⁾ 둘째, x=0.4 이상인 경우 x가 증가함에 따라 효율이 감소하는 이유는 J_{sc}와 FF가 감소에 기인함을 Fig. 5에서 알 수 있다. 먼저 p-SiC의 탄소농도가 증가함에 따라 FF가 감소하는 이유는 Table 2에 나타낸 바와 같이 태양전지의 직렬저항이 증가하기 때문이며, J_{sc}가 감소하는 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 p-SiC의 밴드갭이 증가함에 따라 p-SiC/i-Si 계면의 준위밀도가 증가하기 때문으로 보인다. 이러한 계면준위는 광여기된 전자들의 재결합준위로 작용하여 전자들의 수집효율을 크게 감소시킨다고 보고되었다.¹²⁾

Table 2. Diode parameters of glass/SnO₂/p-SiC/i-Si/n-Si/Ag thin film solar cells shown in Fig. 2.

CH ₄ /(SiH ₄ +CH ₄)	n	J ₀ (A/cm ²)	R _s (Ωcm ²)
0	1.51	1.25 × 10 ⁻¹¹	3.5
0.2	1.53	1.08 × 10 ⁻¹¹	5.2
0.4	1.63	3.65 × 10 ⁻¹¹	14.5
0.6	1.73	1.13 × 10 ⁻¹⁰	16.5
0.8	1.87	4.55 × 10 ⁻⁹	38.3

3-2. Glass/SnO₂/p-SiC/i-SiC/n-Si/Ag 태양전지의 특성

창층으로 p-SiC 박막을 사용하는 경우에 나타나는 p-SiC/i-Si 계면에서의 급격한 조성차이로 인한 문제를 해결하기 위해 i-SiC층을 삽입하였다. 본 연구에서는 i-SiC 중착시 기체조성 x를 조절하여 i-SiC의 조성변화에 대한 태양전지의 특성 변화를 관찰하였다. Fig. 6에 i-SiC 박막 중착시 x에 따른 태양전지의 암상태 전류-전압 특성을 나타내었다. 이 결과로부터 다이오드 변수들을 계산하여 Table 3에 정리하였다. x=0인 경우는 i-SiC 완충층이 없는 p-SiC (x=0.4)/i-Si/n-Si 접합구조에 해당한다. 완충층으로 삽입된 i-SiC의 기체조성 (x)이 0.2인 경우 J₀와 R_s는 각각 7.1 × 10⁻¹²A/cm²과 0.7Ωcm²로 가장 낮은 값을 나타내었다. 다이오드의 역포화전류밀도 (J₀)는 접합에서 재결합 준위와 관련되므로 이상의 결과는 완충층이 없는 p-SiC/i-Si 계면보다 완충층이 삽입된 p-SiC/i-SiC/i-Si 접합에서 재결합준위로 작용하는 국부준위밀도가 낮다는 것을 의

Table 3. Diode parameters of glass/SnO₂/p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si/Ag thin film solar cells shown in Fig. 6.

CH ₄ /(SiH ₄ +CH ₄)	n	J ₀ (A/cm ²)	R _s (Ωcm ²)
without i-SiC	1.63	3.6 × 10 ⁻¹¹	14.5
0.1	1.62	9.0 × 10 ⁻¹¹	2.3
0.2	1.60	7.1 × 10 ⁻¹²	0.7
0.25	1.58	8.5 × 10 ⁻¹²	4.0
0.3	1.71	2.9 × 10 ⁻¹¹	35.7

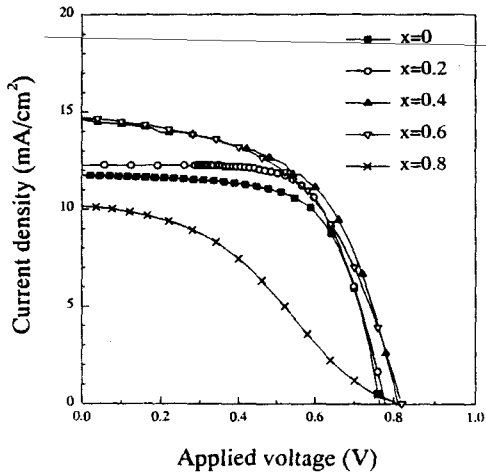


Fig. 4. Light state J-V characteristics of glass/SnO₂/p-SiC/i-Si/n-Si/Ag thin film solar cells under light intensity of 100mW/cm². The gas phase composition, $x = CH_4/(SiH_4 + CH_4)$, was varied during deposition of the p-SiC layer.

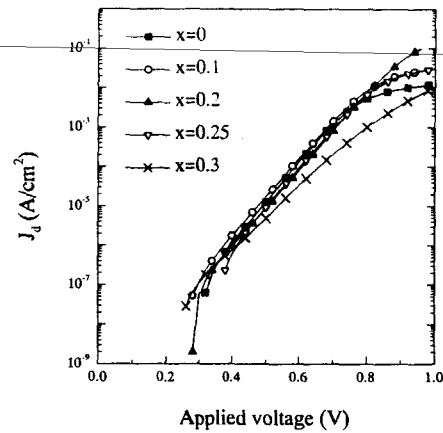


Fig. 6. Dark state J-V characteristics of glass/SnO₂/p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si/Ag thin film solar cells. The gas phase composition, $x = CH_4/(SiH_4 + CH_4)$, was varied during deposition of the i-SiC buffer layer.

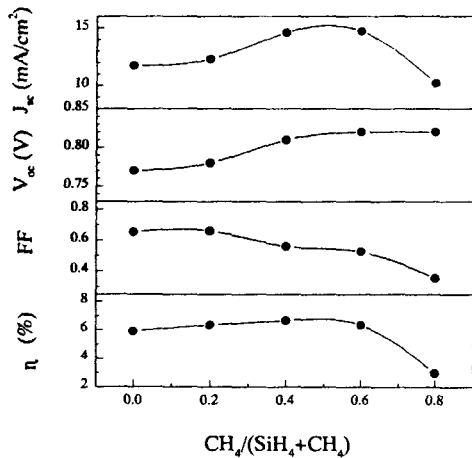


Fig. 5. Solar cell parameters of glass/SnO₂/p-SiC/i-Si/n-Si/Ag thin film solar cells as a function of the gas phase composition(x) during deposition of the p-SiC layer.

미한다. 또한, i-SiC 완충층을 삽입하여 태양전지의 직렬저항이 감소하는 것으로 보아 SiC의 체적저항보다 p-SiC/i-Si 계면의 접촉저항이 소자 전체의 직렬저항에 훨씬 더 큰 기여를 하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 i-SiC를 p-SiC와 i-Si 사이에 삽입함으로써 계면의 국부준위밀도를 감소시키고 소자의 누설전류와 접촉저항을 줄일 수 있다고 결론지을 수 있다. 한가지 더 지적할 점은 p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si 다중접합 구조에서 계면상태는 i-SiC의 조성이 중요한 인자가 되며, i-SiC의 기체조성 ($x=0.2$) 이 p-SiC ($x=0.4$)와 i-Si($x=0$)의 중간일 때 가장 좋은 접합특성을 나타내었다는 점이다.

완충층이 삽입된 Glass/SnO₂/p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si/Ag 태양전지의 광상태 전류-전압 특성을 나타낸 Fig. 7로부터 태양전지의 변수를 구하여 Fig. 8에 나타내었다. 완충층이 없는 p-SiC/i-Si/n-Si 구조의 태양전지의 효율은 6.6%를 나타내었으나, p-SiC ($x=0.4$)와 i-Si의 중간

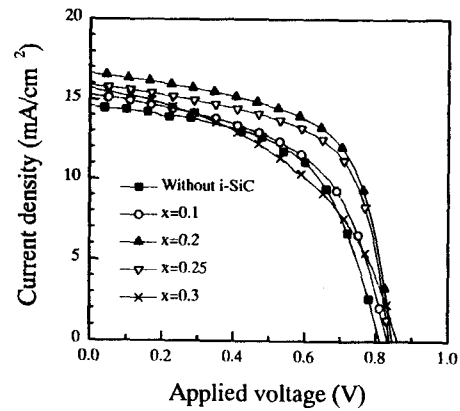


Fig. 7. Light J-V characteristics of glass/SnO₂/p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si/Ag thin film solar cells under light intensity of 100mW/cm². The gas phase composition, $x = CH_4/(SiH_4 + CH_4)$, was varied during deposition of the i-SiC buffer layer.

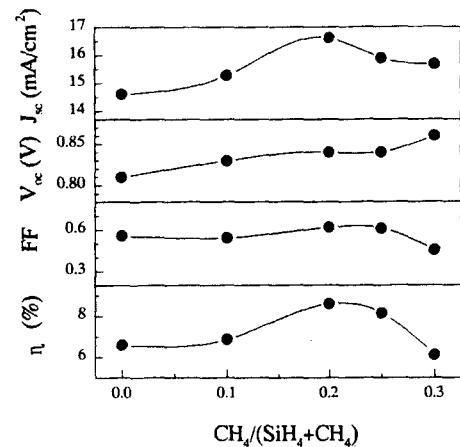


Fig. 8. Solar cell parameters of glass/SnO₂/p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si/Ag thin film solar cells as a function of the gas phase composition(x) during deposition of the i-SiC buffer layer.

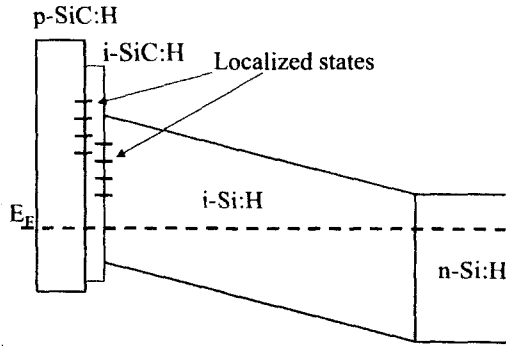


Fig. 9. Energy band diagram of a p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si heterojunction.

조성인 i-SiC ($x=0.2$) 박막을 완충층으로 삽입한 p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si 구조의 태양전지 효율은 8.6%를 나타내었다. 이는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 J_{sc} 의 현저한 증가에 기인하며 Fig. 9에 나타난 에너지대 그림으로 설명할 수 있다. Fig. 3과 같이 완충층이 없는 구조에 비해 i-SiC 완충층을 p-SiC/i-Si 계면에 삽입한 경우(Fig. 9) 계면에서의 조성단차는 감소하게 되고, 이 결과로 계면의 국부준위밀도 또한 감소한다. 따라서 이종접합 계면에서 광여기된 전자-정공 쌍의 재결합에 의한 손실은 감소하고 J_{sc} 는 증가하게 된다. 본 연구에서 특히 계면에서의 조성단차가 가장 작은 완충층(본 실험에서는 $x=0.2$)을 계면에 삽입한 경우에 가장 큰 J_{sc} 를 얻을 수 있었는데 이는 위의 설명을 잘 뒷받침하는 결과이다.

4. 결 론

플라즈마 화학증착법으로 유리기판 위에 p-SiC/i-Si/n-Si 이종접합 구조의 박막 태양전지를 제작하였다. 증착 중에 SiH_4 와 CH_4 의 기체농도를 조절하여 창층인 p-SiC의 조성을 변화시켜 본 결과 기체 조성(x)이 0.4일 때 태양전지의 효율이 가장 높았다. p-SiC 증착시 x 가 증가함에 따라 광학적 밴드갭이 증가하여 접합영역에 도달하는 광자의 수집효율을 높이지만, 창층 재료의 전기비저항과 p-SiC/i-Si 계면의 급격한 조성단차로 인한 접촉저항이 증가하여 소자의 직렬저항이 증가하게 되고 이로 인해 충실도와 광수집효율이 감소되는 문제가 발생하였다. 이러한 문제는 p-SiC/i-Si 계면에 중간조성을 가진 i-SiC를 삽입함으로써 개선되었다. p-SiC/i-SiC/i-Si/n-Si 다층구조의 박막 태양전지는 i-SiC 완충층이 없는 구조와 비교하여 J_0 , R_s 가 크게 감소하였고, 광여기된 전하들의 수집효율 또한 향

상되었다.

감사의 글

본 연구는 에너지관리공단의 연구비 지원하에 수행되었으며, 또한 한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재특성평가 연구센터(RRC)의 논문연구비 지원을 받아서 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. P. Stulik and J. Singh, *J. Non-Cryst. Solids*, **242**, 115-121 (1998).
2. J. Meier, S. Dubail, J. Cuperus, U. Kroll, R. Platz, P. Torres, and J. A. Anna Selvan, *J. Non-Cryst. Solids*, 227-230, 1250-1256 (1998).
3. T. Shinya, S. Souichi, N. Shoichi, *Appl. Surf. Sci.*, **113/114**, 734-740 (1997).
4. E. Terzini, C. Privato, S. Avagliano, P. Mangiapane, T. Fasolino, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **420**, 15 (1996).
5. S. H. Baker, W. E. Spear, and R. A. G. Gison, *Philos. Mag.*, **B62**, 213 (1990).
6. I. Salmon, and L. R. Tessler, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **336**, 505 (1994).
7. Y-M. Li, *Mater. Res. Soc. Sym. Proc.*, **297**, 803 (1993).
8. K. Miyachi, N. Ishigo, and N. Fukuda, *Proc. E. C. Photovoltaic Sol. Energy Conf.*, 11th, pp. 88 (1993).
9. Y. Nakata, H. Nitta, T. Yamaguchi, and Y. Hamakaya, *Sol. Energy Mater.*, **3**, 313 (1990).
10. K. S. Lim, M. Konagai, and K. Takahashi, *J. Appl. Phys.*, **56**, 2 (1984).
11. W. Y. Kim, Tasaki, M. Konagai, and K. Takahashi, *J. Appl. Phys.*, **61**, 8 (1987).
12. H. Tasaki, W. Y. Kim, M. Hallerdt, M. Konagai, and K. Takahashi, *J. Appl. Phys.*, **63**, 2 (1988).
13. M. Lundstorm, *Solar cells and their applications*, pp. 2-20, L. D. Partain, John Wiley and Son., New York, (1995).
14. R. Platz, D. Fischer, and A. Shah, *Mat. Res. Soc. Symp.*, **377**, 645 (1995).