

델타 도핑한 P형 SiC막의 평가

김태성·정우성·남해곤
전남대학교 전기공학과

Characterization of Delta-Doped P-Type SiC Films

Tae-Seong Kim · Woo-Seong Jeong · Hae-Kon Nam

Chonnam National University

요 약

P층의 정공농도를 높이기 위하여 δ -doped P층을 갖는 새로 구상된 a-Si태양전지를 제작하였다.

δ -doped P층은 0.1-0.5 원자층의 박막 B층과 undoped a-Si의 여러층으로 구성되어 있다. B층은 광 CVD법과 열분해기법으로 증착시켰다. δ -doped P층 박막에 대한 구조적, 광학적 및 전기적 특성을 FTIR, AES, SIMS등을 이용하여 평가하였다.

이 연구의 결과로서는 δ -doped P층을 갖는 태양전지에 대하여 12.5%의 에너지 변환효율을 달성하였다.

ABSTRACT

Novel a-Si solar cells with delta-doped(δ -doped) P-layer have been fabricated to enhance the hole concentration of the P-layers.

The δ -doped P-layer consists of very thin B sheets of 0.1-0.5 atomic layers and undoped a-SiC multi-layers. B-layers were prepared by photo-CVD and pyrolysis technique.

The structural, optical and electrical characteristics of the delta-doped P-layer films were evaluated by means of FTIR, AES and SIMS.

As the results of this study, it was found that the δ -doped P-layer showed much superior optical and electrical characteristics than those of conventional uniformly B-doped a-Si layers. 12.5% energy conversion efficiency was achieved for the Cell with δ -doped P-layer.

1. 서 론

2000년대의 태양광 발전은 지상발전 즉 분산형 소규모발전, 대·중규모 집중형발전 및 우주발전 등이 실현될 전망이다. 21세기의 전력이라 일컬어지는 전력용 a-Si 태양전지의 실용화를 위한 태양전지의 연구는 광전에너지 변환의 고효율화, 저가격화, 고속제조, 신재료개발 및 양호한 막질의 형성 등에 목표를 두고 있다.

지금까지의 태양전지의 연구는 저렴화면에서는 a-Si 태양전지가, 전력화란 점에서는 Si 결정 태양전지가, 새로운 태양전지 제조법의 개발이란 측면에서는 II-VI족 화합물[CdS, CdTe, CuInSe₂] 태양전지가 각광받고 있는 실정이다. 그리고 대면적, 고효율, 저가격, 저광열화 및 신기술이라는 면에서 21세기의 태양전지라고 일컬어지고 있는 화합물 반도체 박막결정 태양전지가 주목되고 있다.

a-Si 태양전지는 저가격이라는 점에서는 장점이지만, 에너지 변환효율이 낮다. a-Si 태양전지의 변환효율은 현재 12%선에 머물고 있다. 따라서 앞으로 a-Si 태양전지를 전력용전원으로 하기 위해서는 에너지 변환효율을 향상시키지 않으면 안된다. 그런데 현재의 태양전지의 효율은 P층의 성질¹⁾에 크게 제한 받고 있다. 따라서 P층을 개선시키면 태양전지를 고효율화 할 수 있다.

현재 P층으로 사용되고 있는 Boron [B]를 doping한 a-SiC막의 Carrier농도는 $10^{14}-10^{15}$ [cm⁻³] 정도로 낮아서 P층이 거의 공핍화되어 개방전압이 낮으므로, P층의 Carrier농도를 10^{18} [cm⁻³] 정도까지 향상시키면 약 1[V]의 높은 개방전압이 얻어져서 변환효율도 크게 향상되리라고 생각된다.²⁾ 따라서 종래와 같이 균일한 방법으로 B를 doping하는 방식에서는 B를 많이 doping시키면 결함준위가 급격히 증가되어 막질이 열화되므로 효율은 오히려 떨어지는 결과를 가져온다.

본 연구에서는 a-Si 태양전지의 P층의 Carrier 농도를 향상시켜 태양전지를 고효율화할 목적으로 P층 막을 delta [δ]-doping³⁻⁴⁾하여 그 막질을 평가하였다.

2. Delta-doped P층의 이론적 고찰

현재 P층으로 사용되고 있는 Boron [B]를 doping한 a-SiC막의 Carrier농도는 $10^{14}-10^{15}$ [cm⁻³] 정도로 낮아서 P층이 거의 공핍화되어 개방전압이 낮으므로 P층의 Carrier농도를 10^{18} [cm⁻³] 정도까지 향상시키면 약 1[V]의 높은 개방전압이 얻어져, 변환효율도 크게 향상되리라 생각된다. 따라서 종래와 같이 B를 균일 doping하는 방식에서는 Carrier농도를 증가시키기 위해서도 B를 많이 doping시키면 결함 준위가 급격히 증가되어 막질이 열화되므로 효율은 오히려 떨어지는 결과를 가져온다. 그래서 δ -doping법²⁾을 도입하였다. δ -doping법이란 doping층, 즉 B층과 undoping층, 즉 SiC층을 교대로 증착시켜서 Fig 2-1에서와 같이 다수 Carrier인 정공의 공급층과 전도층을 분리시킨 것이다. 이렇게 하면 정공농도는 B량으로 결정되고, 정공의 성질 [이동도]은 undope층에서 좌우되므로, 막질을 열화시키지 않고 B량을 대폭 늘려서 Carrier농도를 크게 증가시킬 수 있다.

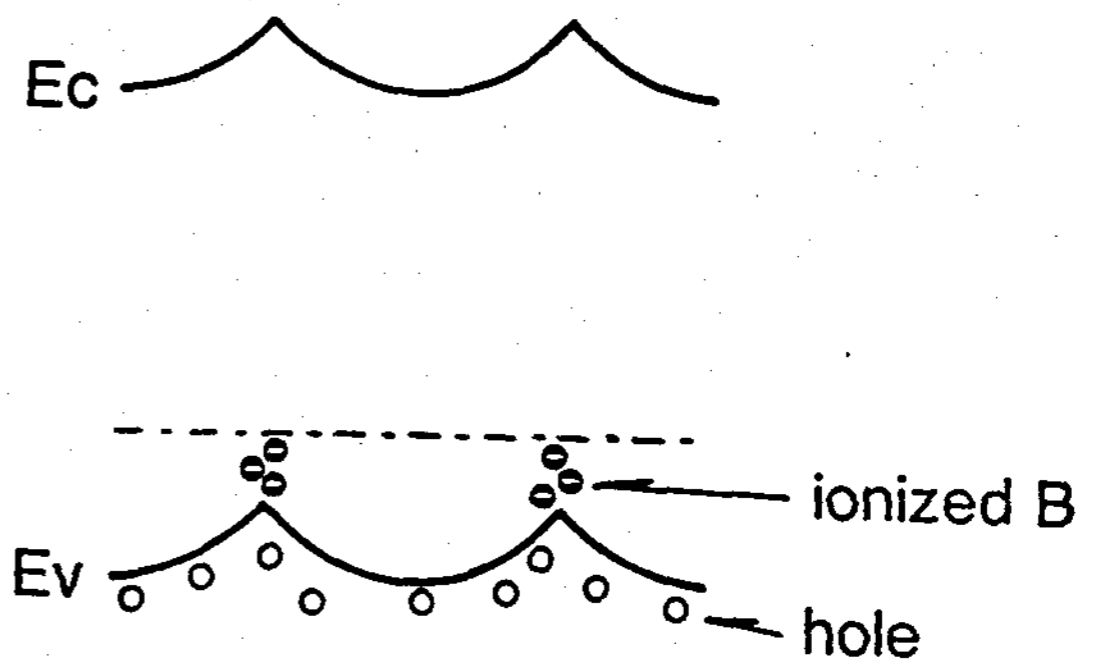


Fig. 2-1 Basic concept of δ -doping

3. 실험 장치 및 방법

태양전지용 막은 B를 균일 dope, δ -dope 및 undope 등의 3종류로 증착시켜서 제작하였

다. 또한 이 3종류의 박막은 4×10^{-7} [Torr] 이하의 진공도를 가진 3실분리형 광 CVD 장치를 이용하여 제작하였다. 광 CVD 장치의 광원은 저압 수은 lamp [USH 10, 자외선 조사장치]를 사용하였고 또 막 퇴적을 고속화 하기 위해서 수은 증감법을 이용하였다.

Fig. 3-1은 3실 분리형 광 CVD 장치의 개략도이다. Fig. 3-1에서 우측으로 부터 순차로 시료 준비실 및 p.i.n 퇴적반응실 등 4개의 반응실로 구성되어 있다.

δ -dope와 균일 dope 박막을 제작하는데 사용된 B가스로써 B_2H_6 를 사용하였고, B가스의 유량은 13[S/cm]이었으며, 수소를 희석시켜 사용하였다. δ -dope P층은 10층의 B층과 undope층을 교대로 증착하여 a-SiC:H 박막으로 제작하였다. undope a-SiC층은 Si_2H_6 와 C_2H_2 를 원료가스로 사용하여 직접 여기 광 CVD법으로 성막하였다.

적외분광 Spectrum⁵⁾은 Fourier변환 적외분광 광도계 [Shimadzu Model FTIR-4300, Japan]를 이용하였다. 광투과율은 가시자외분광광도계 [JASCO, Model UVIDE-430B, Japan]을 이용하여 측정하였다.

P.i.n층의 성막 조건은 Table 1과 같다.

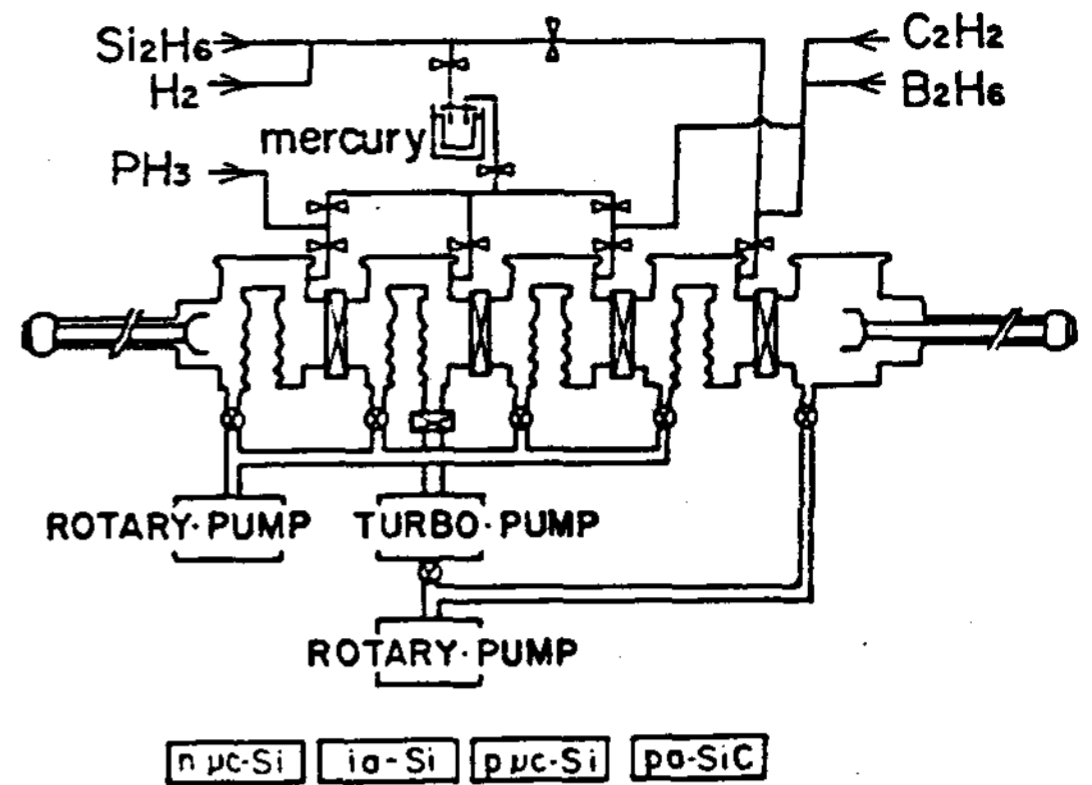


Fig. 3-1 Schematic diagram of Photo-CVD system with three-separated-reaction chamber

4. 실험결과 및 고찰

4.1 δ -doped P층의 평가

4-1-1 구조적 평가

δ -doping된 P층 중에 B가 기대한 만큼 δ 함

Table 1. Preparation Conditions for a-Si Solar Cells with δ -doped P-layers

	p-layer		i-layer	n-layer
	undoped a-SiC	B layer		
Wavelength of Hg lamp(Å):	1849	1849	2537	1849
Deposition method:	D	D	H	H
Reactant gases:	Si_2H_6 C_2H_2, H_2	B_2H_6, H_2	SiH_4	Si_2H_6 PH_3, H_2
Total pressure(Torr):	0.2	1.0	0.3	0.9
Substrate temperature(°C):	250	200-300	240	250

D:Direct photo-CVD

H:Mercury-sensitized photo-CVD

수적으로 doping되는가 혹은 증착실 내의 열의 영향으로 막 중에 확산되어 버리는가를 확인하기 위하여 증착된 P층의 구조를 조사하였다.

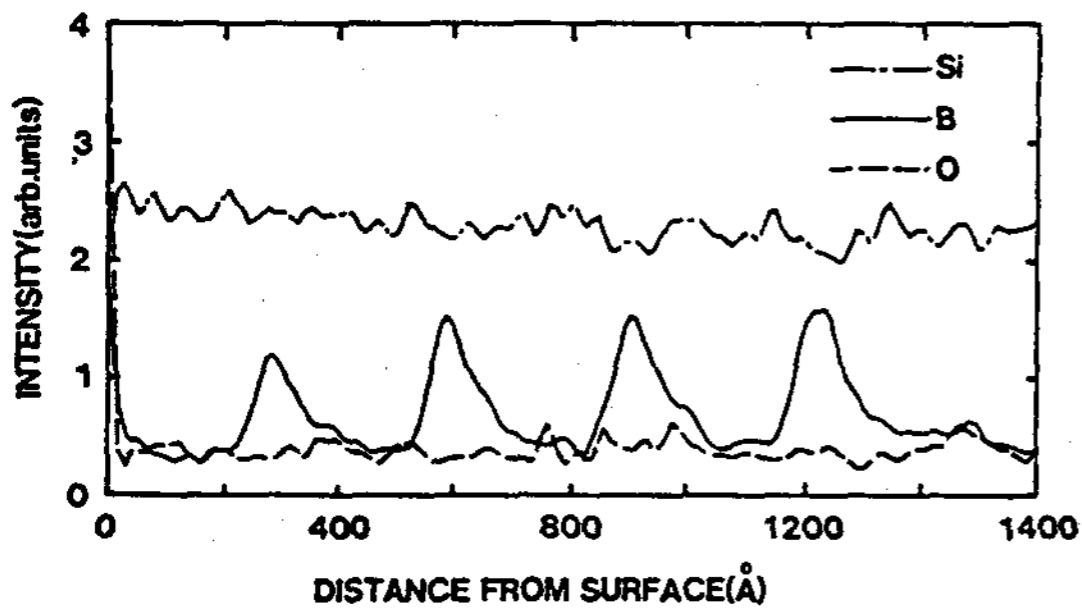


Fig.4-1 Depth profile of boron in δ -doped P-layer measured by AES

Fig.4-1에서 산소 O와 보론 B의 Peak가 명확히 구분되어 관찰되었는데, 이 결과는 undoped 층과 B층을 교대로 증착할 때 발생할 수 있는 산화막이 없이 순수한 B가 막 중에 확산되지 않고 δ 함수적으로 증착되었음을 증명해 주고

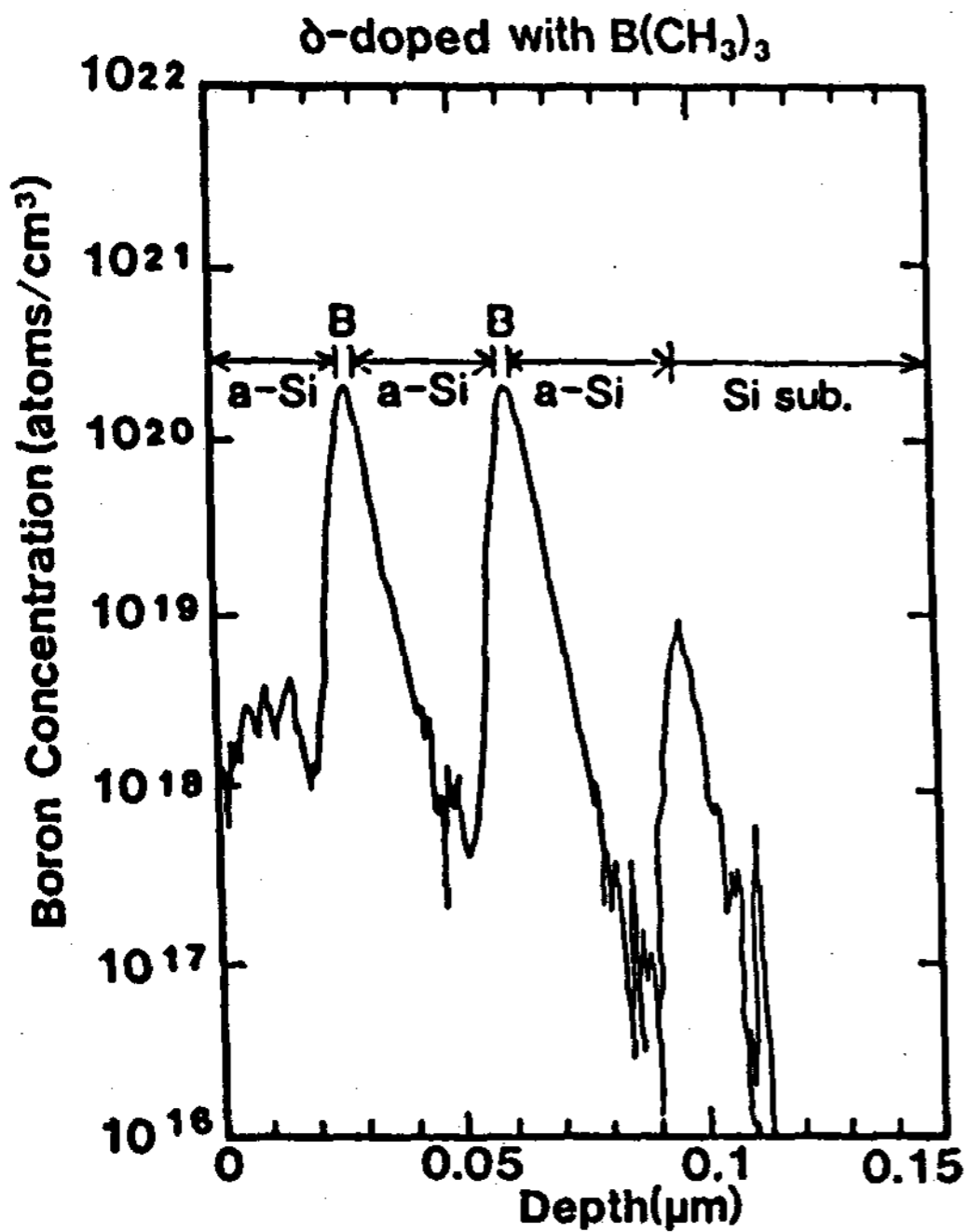


Fig. 4-2 Boron profile in the a-SiC:H film with a δ -doped P-layer measured by SIMS

있다.

이번에는 δ -doped P층 중의 B의 절대량을 측정하기 위해서 SIMS [Secondary ion mass spectrometry]로 분석하였다.

Fig.4-2에서도 B층에서만 B량이 대량으로 관찰되었고, SiC층에서는 B가 전혀 관찰되지 않았다. 이 결과는 Fig.4-1의 결과와 잘 일치되고 있다. 또 B를 균일 dope 할 때는 P층의 B량은 10^{17} [Cm^{-3}]이었는데, δ -dope 때는 10^{21} [Cm^{-3}] 정도로 B의 농도가 향상 되었음을 알 수 있었다.

4-1-2 광학적 및 전기적 평가

δ -doped P층의 광학적 특성을 평가하기 위해서 Fig.4-3과 같이 B를 균일 dope, undoped 및 δ -dope한 P층의 적외선 흡수계수 스펙트럼을 비교 분석하였다.

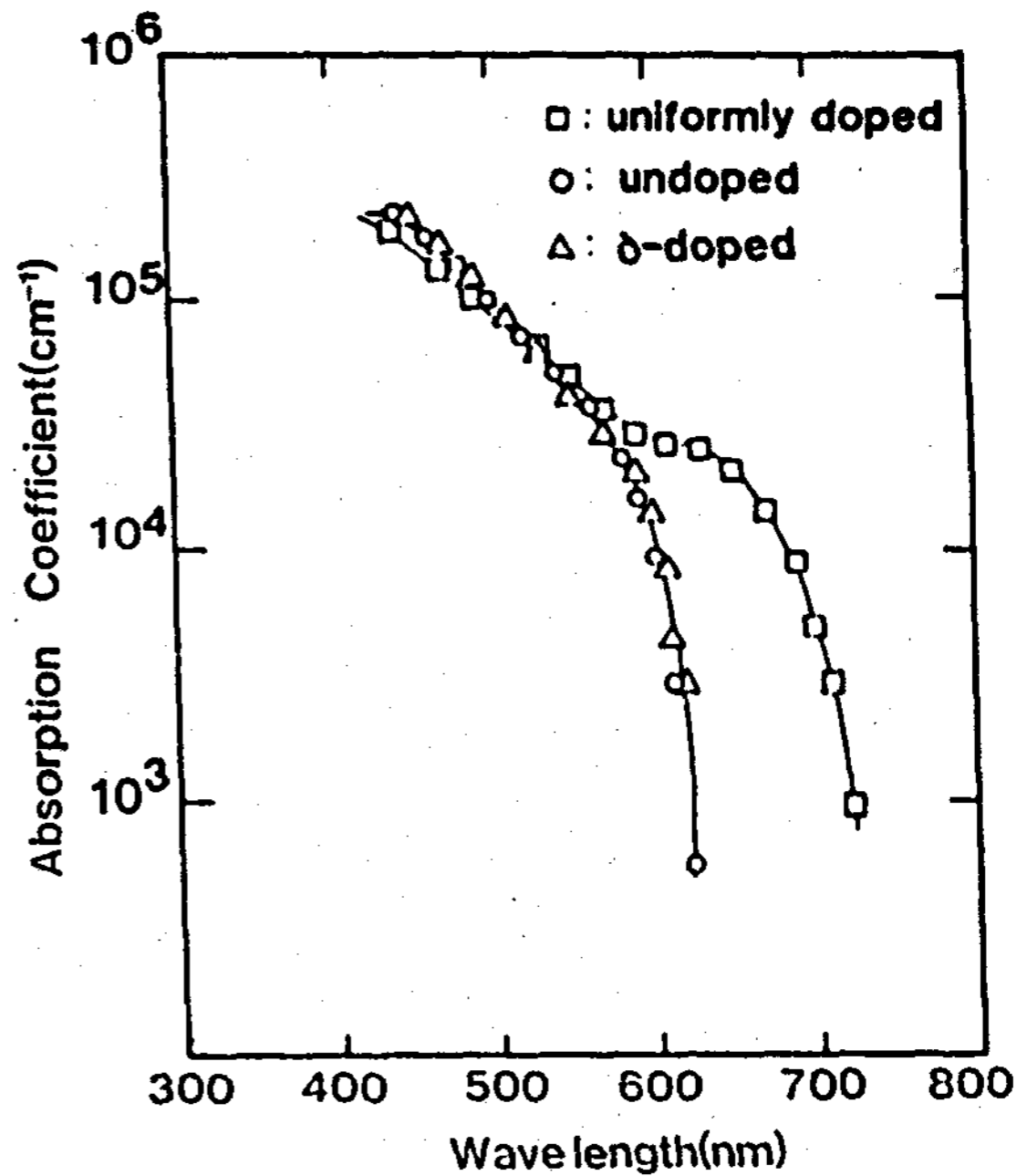


Fig.4-3 Infrared absorption spectra of the films with δ -doped, uniformly doped and undoped layer

δ -dope층은 B를 $300[\text{Å}]$ 주기로 10층 퇴적시켰고 광학 band gap은 undoped P층과 δ -doped P층이 약 $2[\text{eV}]$ 로 거의 같았다. Fig.4-3에서 보는 바와 같이 undoped와 δ -dope 곡

선이 거의 일치하고 있고, δ -dope P층이 파장 550[nm]이상의 장파장 측의 흡수가 적으며 또한 우수한 투과특성을 나타냈다. 이와같은 사실은 δ -doping으로 B량이 증가하여도 결함의 증가가 억제된 결과라고 생각된다.

이번에는 δ -dope한 박막의 전기적 특성을 알아 보기위해서 δ -doped P층에 전극을 부착시켜서, B층에 평행한 방향의 도전율을 측정 한 결과 광도전율과 암도전율이 각각 $1.5 \times 10^{-1} [scm^{-1}]$, $3.7 \times 10^{-6} [scm^{-1}]$ 이었다. 여기에서 광도전율이 δ -dope의 경우가 균일 dope보다 한차원 높은 값을 나타냈는데, 그 이유는 P층막의 결함의 감소와 고농도 doping에 의한 Carrier의 전도특성이 향상된 때문이라고 생각된다.

4-1-3 적외투과율 스펙트럼 평가

δ -doped P층의 막질을 좀 더 정밀히 분석하기 위하여 Fourier 변환 적외분광 [FTIR] 스펙트럼 변화⁶⁾를 조사하였다.

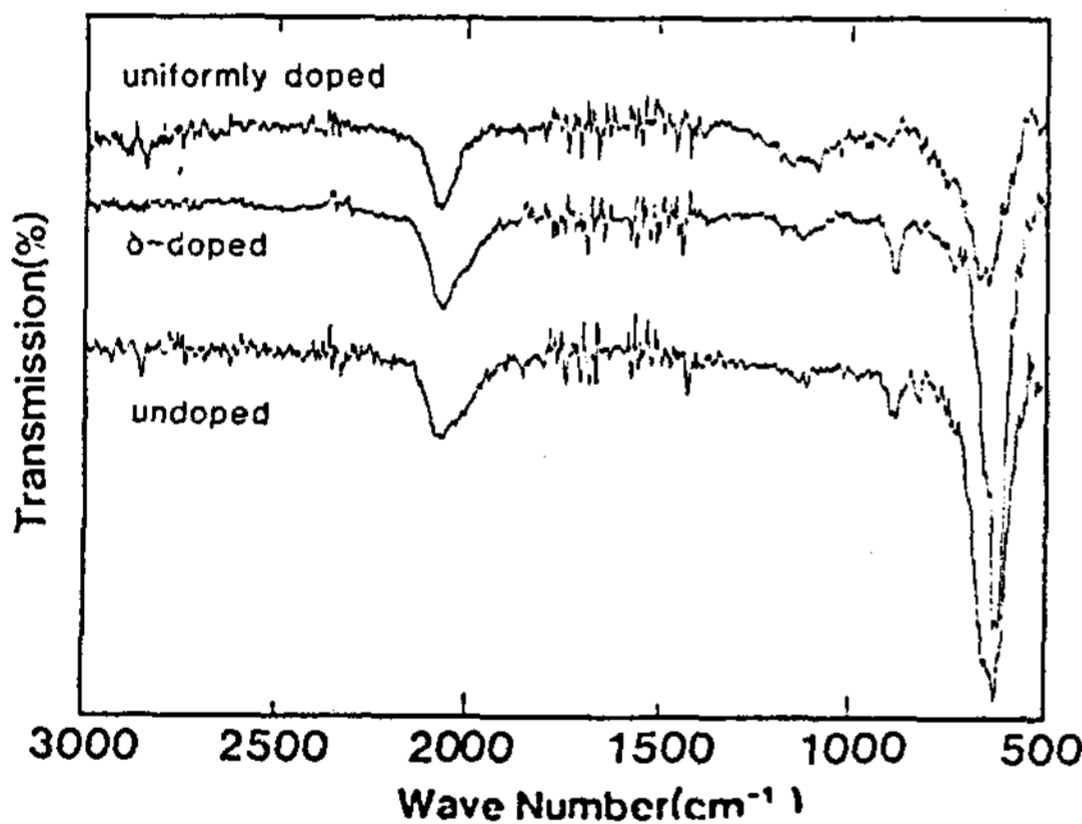


Fig.4-4 Infrared transmission spectra of the films with uniformly doped, δ -doped and undoped layer

Fig.4-4는 파장 500-3000 [cm⁻¹] 사이에서의 δ -doped P층의 FTIR 스펙트럼이다. Fig.4-4에서 B를 δ -dope한 스펙트럼과 undope한 스펙트럼이 거의 같고, 균일 dope한 스펙트럼이 δ -dope와 undope 스펙트럼 보다 상이하였다. δ -dope층과 undope 층에서 파장 640 [cm⁻¹]때 rocking mode SiH_x가 있고, 파장 740

[cm⁻¹]에서 SiC가 보이며 파장 900 [cm⁻¹] 근처에서 bending mode SiH₂가 각각 거의 같은 량으로 나타나있다. FTIR 스펙트럼에서, 파장 2000 [cm⁻¹]는 stretching mode로서 SiH₂와 SiH를 나타내고 있는데 SiH₂는 열화의 원인이며 SiH는 다소 있어도 양호하다. 2000 [cm⁻¹] peak는 SiH와 SiH₂ 두 Peak의 합이다. 2000 [cm⁻¹] peak에서 δ -dope 층과 undope 층은 SiH가 많고 SiH₂가 소량인 반면 균일 dope층에서는 SiH가 소량이고 SiH₂가 많이 포함되어 있다. 따라서 균일 dope층의 막질이 가장 불량함을 알 수 있었다. 파장 2890 [cm⁻¹] 근처에서 CH₂ mode, 2940 [cm⁻¹]에서 CH₃ mode 인데 이 두 mode는 모두 막질을 불량하게 하는 요소로서, δ -dope층에서는 거의 포함되어 있지 않고 있어서 δ -dope의 막질의 우수함을 증명해주고 있다.

결국 FTIR투과율 스펙트럼 분석에서도 δ -doped P층과 undoped P층이 rocking, bending 및 stretching mode가 거의 같고 또 막질에 큰 영향을 미치는 SiH₂량도 미소하였는데 이 결과는 B량이 증가해도 막질의 결함준위가 억제된다고 생각된다.

4-1-4 H₂ 방출량 평가

a-Si 박막 중의 수소는 a-Si계 재료의 구조에

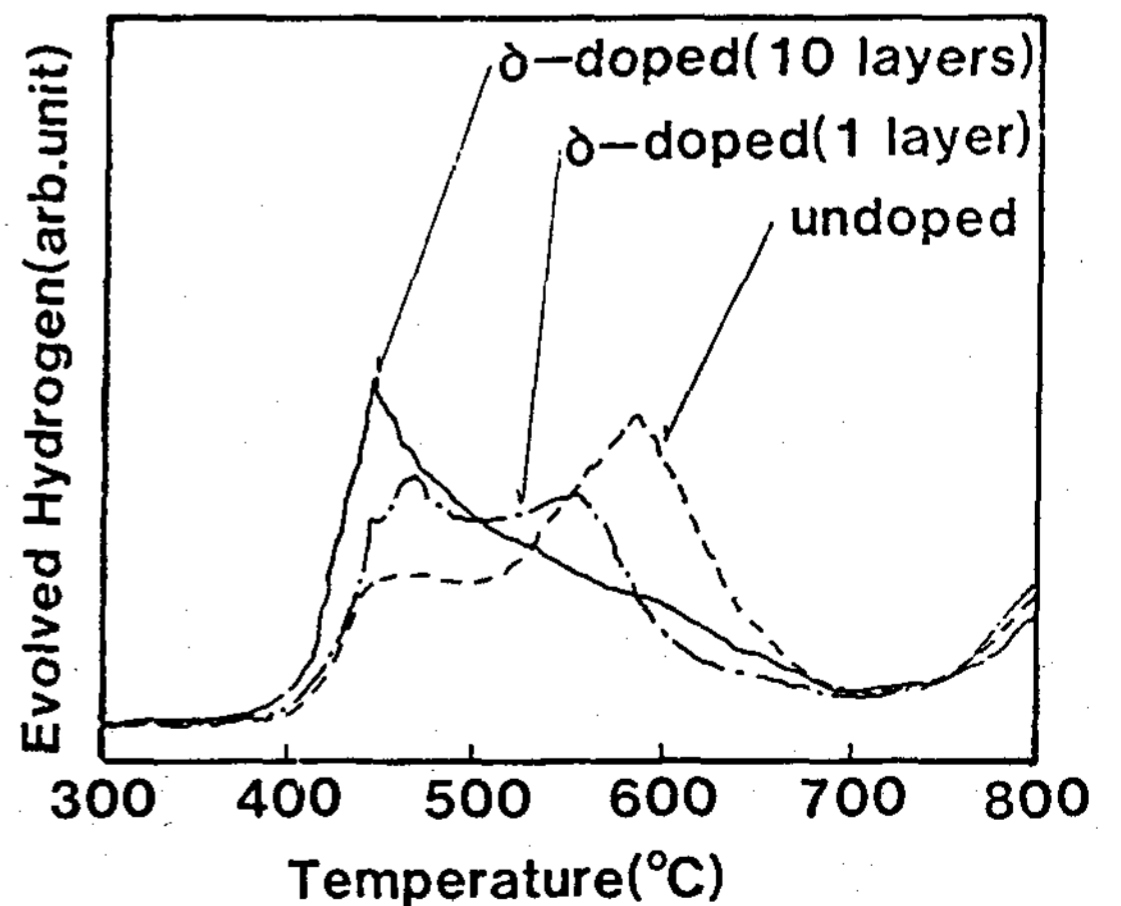


Fig.4-5 Hydrogen evolution spectra of δ -doped and undoped films

큰 영향을 미친다. 따라서 FTIR로 판명되지 않는 비결합 수소량과 결합강도 등을 알기 위하여 수소방출 온도특성을 조사하였다.

Fig.4-5는 undope 막과 δ -dope 막에 대한 H_2 방출온도 특성곡선이다. Fig.4-5에서 undope한 막과 B를 δ -dope한 막은 전형적인 저온과 고온 두 peak가 보이고 있다. 또 수소방출량을 조사해 본 결과 undope한 박막의 경우는 박막 중의 Si결정 구조로부터 결합수소의 이탈이나 확산등이 생겨서 고온에서 peak가 크고, 그리고 δ -dope의 층수가 증가함에 따라 저온측의 피크가 증가하였다. 이와같이 저온에서 방출된 수소가 어떤 형태로 박막 중에 남아서 어떤 영향을 미치는가는 현재로서는 확실치 않으나, 앞으로 δ -dope층의 막질개선의 여지가 있는 부분이라고 생각된다.

4-2. δ -doped P층을 이용한 태양전지

B를 δ -dope한 P층은 균일 dope한 P층 보다 양호한 전기적 및 광학적 특성을 갖고 있음이 평가 되었다. 따라서 δ -doped P층을 이용하여 실제로 태양전지를 제작하여 에너지 변환 효율을 구하였다. Fig.4-6는 δ -doped P층을 갖는 태양전지의 구조이다.

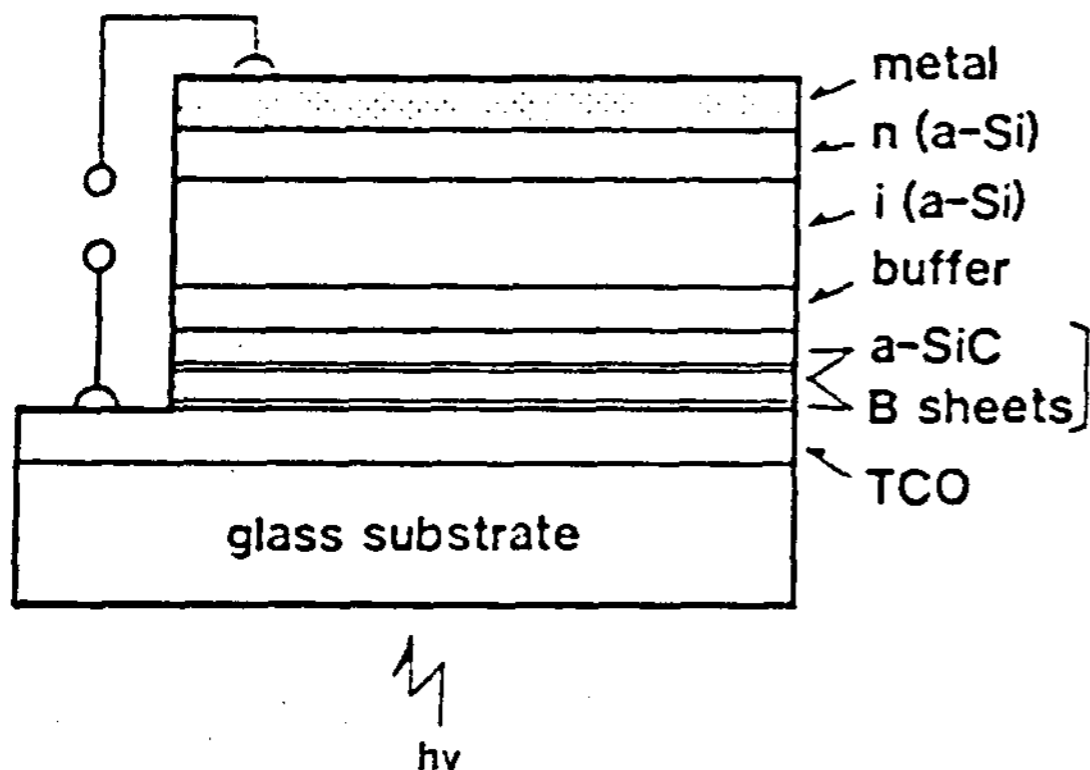


Fig.4-6 Schematic structure of solar cells with δ -doped P-layers

Fig.4-6에서 TCO/undoped a-SiC 층간에 B층을 dope 하였고, p/i계면에는 buffer층을 형성시켰다. 또 SiC의 한층의 두께는 20[Å], 시료

의 기판 온도는 250[°C] 반응실내에 B_2H_6 를 공급하는 시간은 5[분], P층의 전체두께는 50[Å]일때 Fig.4-7과 같은 최고 에너지 변환 효율 12.5[%]를 얻을 수 있었다.

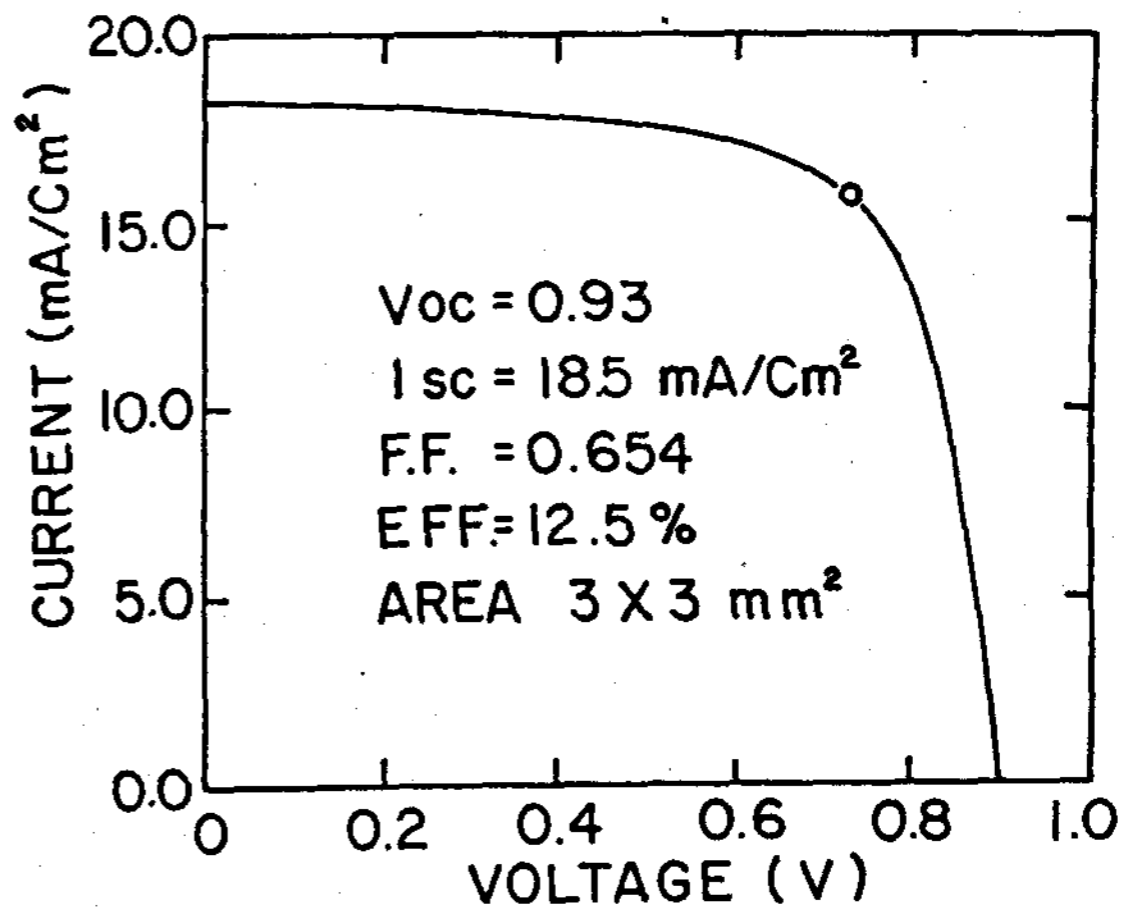


Fig.4-7 Illuminated I-V characteristics of the highest efficiency a-Si Solar cell with δ -doped P-layer

5. 결 론

P층의 carrier 농도를 향상시켜 고효율 a-Si 태양전지를 제조할 목적으로 P층에 B를 δ -dope시켜 그 막질을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① P층에 B를 δ -dope 시켰더니 균일 dope 때보다 한 차원 높은 10^{21} [cm⁻³]의 B량이 증착되었다.
- ② δ -doped P층이 균일 doped P층 보다 장파장 측의 흡수계수가 적고, 높은 광도전율을 나타냈는데 이것은 B량의 증가에 따른 막결합의 증가가 억제되기 때문임이 입증되었다.
- ③ 3실 분리형 광 CVD장치를 써서 만든 δ -doped P층을 갖는 태양전지의 개방전압은 0.9[V]이상으로 높아졌으며, 이때 최고 에너지 변환효율 12.5[%]를 얻을 수 있었다.

이상과 같은 결론으로부터 P층에 B를 δ -dope 시키면 균일 dope 때보다 B량은 증가하

고 막의 결함준위가 억제되어 carrier 농도가 향상되었다. 따라서 δ -dope 법은 막질이 구조적, 광학적 및 전기적으로 우수하게 평가되어서 에너지변환 효율도 향상되었다.

참 고 문 헌

1. K.Tarui, et.al., "Approaches for High-Efficiency a-Si Solar Cells", 4th Int. Photo, Sci & Eng. Conf. Sydney. Australia PP.1-6(1989).
2. T.S.Kim, et.al., "High Efficiency a-Si Solar Cells with Delta-doped P-Layer" '89 추계 한국 태양에너지학회 학술발표. PP.23-27 (1989).
3. S.Yamanaka, et.al., "High-Performance Hydrogenated Amorphous Silicon-Germanium Solar Cells Fabricated by photo Chemical Vapor Deposition", J.J. Appl. Phy. 26(7). PP.1107-1111(1987).
4. M.Konagai, "Technical Status of Amorphous Silicon Solar Cells", ISES Solar World Congress, Hamburg. PP.85-92 (1987)
5. Haylsi, "Fourier 변환 적외분광법" 학회출판센터 (동경). PP.147-184(1987)
6. K.Takahashi, M Konagai, "Amorphous 태양 전지", 소광당(동경). PP.111(1988)

vironmental factors for crops in hydroponic culture within plastic greenhouse by using the computer model developed from the heat balance around leaves of a crop.

A computer model was developed and verified through comparison with the experimental results for lettuce in hydroponic culture in a polyethylene film house.

The model may be extensively used for the water management and thermal environment study of crops in protected culture, if the supplemented studies for some crops would be accomplished.

Thermodynamic Optimization of a Organic Rankine Power Cycle

W.Y.Lee · S.H.Woon · H.S.Chung

Korea Institute of Energy & Resources

ABSTRACT

An analytical equation to estimate the Rankine power cycle efficiency at maximum power for the given mass flow rates of heating and cooling fluids is derived. The accuracy of the result is shown by comparing the analytical values with those calculated one using detailed thermodynamic data. The results indicate that the thermal efficiency at maximum power depends primarily on the initial temperatures of the heating and cooling fluids, and it also depends on the pinch-temperature differences between the working fluid and the heating and cooling fluids. The efficiency at maximum power provides a measure of the power available in a practical Rankine heat engine.

Characterization of Delta-Doped P-Type SiC Films

Tae-Seong Kim · Woo-Seong Jeong · Hae-Kon Nam

Chonnam National University

ABSTRACT

Novel a-Si solar cells with delta-doped (δ -doped) P-layer have been fabricated to enhance the hole concentration of the P-layers.

The δ -doped P-layer consists of very thin B sheets of 0.1–0.5 atomic layers and undoped a-SiC multi-layers. B-layers were prepared by photo-CVD and pyrolysis technique.

The structural, optical and electrical characteristics of the delta-doped P-layer films were evaluated by means of FTIR, AES and SIMS.

As the results of this study, it was found that the δ -doped P-layer showed much superior optical and electrical characteristics than those of conventional uniformly B-doped a-Si layers. 12.5% energy conversion efficiency was achieved for the Cell with δ -doped P-layer.