

논문 99-8-3-11

PERL (passivated emitter and rear locally-diffused cell) 방식을 이용한
고효율 Si 태양전지의 제작 및 특성

권오준, 정 훈, 남기홍*, 김영우, 배승춘, 박성근, 권성렬**, 김우현***, 김기완

Fabrication and Characteristics of High Efficiency Silicon

PERL (passivated emitter and rear locally-diffused cell) Solar Cells

Oh Joon Kwon, Hun Jeoung, Ki Hong Nam*, Yeung Woo Kim, Seung Chun Bae,
Sung Keoun Park, Sung Yeol Kwon**, Woo Hyun Kim***, Ki Wan Kim,

요 약

본 연구에서는 고효율 단결정 실리콘 태양전지의 제작방법인 PERL 방식을 사용하여 비저항이 $0.1 \sim 2 \Omega \cdot \text{cm}$ 을 갖는 (100)면의 p형실리콘 기판으로 n⁺/p/p⁺ 접합의 태양전지를 제작하였다. 이를 위해 웨이퍼의 절단, KOH를 사용한 역피라미드 모양으로의 에칭, 인과붕소의 도핑, 반사방지막과 전극의 증착 및 열처리 등의 공정을 행하였다. 이때 소자표면의 광학적인 특성과 도핑농도가 저항값에 미치는 영향을 조사하고, Silvaco로 n⁺도핑에 대한 확산 깊이와 도핑농도를 시뮬레이션하여 측정치와 비교하였다. AM(air mass) 1.5 조건하에서 입사되는 빛의 세기가 100 mW/cm^2 인 경우의 단락전류는 43 mA, 개방전압은 0.6 V, 그리고 충실도는 0.62 였다. 이때 제작된 태양전지의 광전변환효율은 16 %였다.

Abstract

The n⁺/p/p⁺ junction PERL solar cell of $0.1 \sim 2 \Omega \cdot \text{cm}$ (100) p type silicon wafer was fabricated through the following steps; that is, wafer cutting, inverted pyramidally textured surfaces etching by KOH, phosphorus and boron diffusion, anti-reflection coating, grid formation and contact annealing. At this time, the optical characteristics of device surface and the efficiency of doping concentration for resistivity were investigated. And diffusion depth and doping concentration for n⁺ doping were simulated by silvaco program. Then their results were compared with measured results. Under the illumination of AM(air mass)1.5, 100 mW/cm^2 I_{sc} , V_{oc} , fill factor and the conversion efficiency were 43mA, 0.6 V, 0.62. and 16% respectively.

School of Electronic & Electrical Eng. Kyungpook Nat'l Univ.

* Dept. of Electronic Eng. Kyungil Univ.

** Dept. of Sensor Eng. Kyungpook Nat'l Univ.

*** Major of Electronic materials, Kyungpook Nat'l Univ.

<접수일자 : 1999년 3월 29일>

1. 서 론

최근의 심각한 환경 오염 문제로 인해 청정에너지의 중요성이 점점 더 증대되고 있다. 태양전지는 무공해, 자원의 무한정, 반영구적 수명 등의 장점을 가지고 있으며, 환경 문제뿐만 아니라 인류의 에너지 문제를 궁극적으로 해결할 수 있는 에너지원으로 기대되고 있다.

실리콘 태양전지는 결정질 실리콘, 다결정 실리콘, 및 비정질 실리콘 태양전지로 구분할 수 있다. 비정질 실리콘 태양전지는 유리기판을 사용함으로써 저가격으로 대면적화가 가능하지만 효율이 낮고 열화현상으로 효율이 급격히 떨어지는 단점이 있다. 다결정 실리콘 태양전지는 가격면에서 저렴하다는 장점이 있지만, 효율면에서 단결정 태양전지에 비해 아직도 많은 차이가 있다.

태양전지의 원리인 광기전력 효과의 발견은 거의 150년 이상 되었지만, p/n 접합 단결정 실리콘 태양전지는 1954년 미국 Bell 연구소의 Chapin, Fuller와 Pearson 등^[1]에 의해 최초로 개발되었다. 그리고 전지의 효율이나 그 이론의 발전은 최근 10년간 급격히 이루어졌다.^[2] 1985년 M. A. Green^[3]은 산화막 passivation 기술을 에미터에 적용한 PESC (passivated emitter solar cell)를 개발하였고, 1990년대가 되면서 PESC 방식에서 지속적인 변화와 이방성 에칭기술의 발달로 표면모양을 피라미드 모양과 반사방지막을 사용해서 그효율을 향상시켰다.

단결정 실리콘 태양전지는 1995년 전세계 태양전지 총 생산량의 약 57.4 %를 차지하였으며^[4] 효율이 다른 전지에 비해서 높고, 지속적으로 제조 단가를 낮추는 기술이 개발되고 있기 때문에 다른 분야의 태양전지보다도 계속 그 시장이 성장할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 최신 기술인 고효율 PERL 태양전지의 제작방법과 KOH를 사용한 이방성 에칭법으로^[5] 실리콘 표면에 역 피라미드 구조를 형성한 후 n'p 접합, BSF층과 반사방지막. 의 형성, 그리고 전후면 전극의 증착 등에 대한 공정을 통하여 단결정 실리콘 태양전지를 제작하였다. 이때 도핑농도가 저항값에 미치는 영향을 조사하고 전극 패턴의 형태가 효율에 미치는 영향을 알아보았다. 그리고 반도체 공정 시뮬레이션인 Silvaco로 n'도핑하였을때의 확산 깊이와 도핑농도를 계산하여 측정치와 비교하였고, 태양전지 표면에서의 광학적인 특성과 단락전류밀도, 개방회로 전압, 충실도, 광전변화효율등의 전기적인 특성을 조사하였다.

2. 실험 및 측정

PERL (passivated emitter and rear locally-diffused cell)의 전면은 역피라미드형태를 취하고, 후면은 금속전극이 실리콘에 직접 접촉하지 않도록 전극 부근

의 실리콘을 붕소로 고농도 도핑한 후 SiO₂로 Passivation하고 접촉저항을 낮추는 구조로 되어 있다. 이 방식은 현재 세계 최고의 광전변환효율을 기록하고 있다.^[6] 그림 1에는 PERL 구조의 태양전지 형태를 나타내고 있다

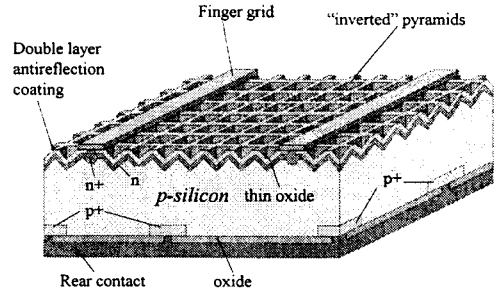


그림 1. PERL 태양전지의 구조

Fig 1. Structure of PERL solar cell

기판은 비저항이 0.1~2 Ω·cm인 붕소가 도핑된 300 μm 두께를 갖는 p형 (100) 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 비저항이 낮은 실리콘 웨이퍼를 사용한 이유는 비저항이 낮을수록 개방전압이 높아지기 때문이다.^[7,8]

우선 실리콘 표면에 역 피라미드형태를 만들기 위한 에칭방법으로 이방성 식각제인 KOH를 사용하였다. 물 400 ml안에 KOH 100 g을 잘 녹여서 항온조 안에서 83 °C상태를 계속 유지시킨 후 17분간 식각했다. 일반적으로 광흡수를 많이 하기 위해 표면형태를 피라미드 모양으로 에칭을 많이 하여 왔으나 최근의 보고에 의하면 역피라미드 모양이 피라미드 모양 보다 빛을 더 많이 흡수한다^[9]고 밝혀졌다. 따라서 본 연구에서는 emulsion mask를 사용하여 약 10~20 μm 크기의 역피라미드를 만들었다.

Texture etching이 완료된 실리콘 wafer 후면에 직렬저항을 감소시키기 위해 전극의 국소적인 면을 1050 °C에서 붕소로 15분간 pre-deposition을 한 후 다시 10분간 drive-in 하여 p'n 접합을 형성 시켰다. p'n 접합이 형성된 후, 전면에 n'p 접합을 형성하기 위해 인을 주입하고, 확산원으로 P₂O₅를 사용하였으며, 1050 °C에서 15분간 pre-deposition을 한 후 다시 10분간 drive-in 하여 확산 주입하여 n'p 접합을 형성 하였다. 표 1에 그 조건을 수록하였고 그림 2는 이때 사용된 확산 전기로의 개략도를 나타내고 있다.^[10] n'p 접합 형성시 접합 특성에 영향을 미치는 변수로는 확산

원인 인의 농도와 carrier 기체의 유량, 확산온도 및 확산시간 등이다.

표 1. 실리콘 태양전지의 n-p 접합의 실험조건
Table 1. Experimental conditions of n-p junction for Silicon solar cell

Source	O ₂ flow (l/min)	diffusion temp. (°C)	diffusion(drive-in) time (min)
P ₂ O ₅	10	1050	10

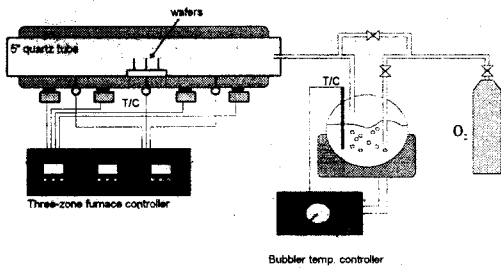


그림 2. 확산 전기로의 개략도
Fig 2. Schematic of diffusion furnace.

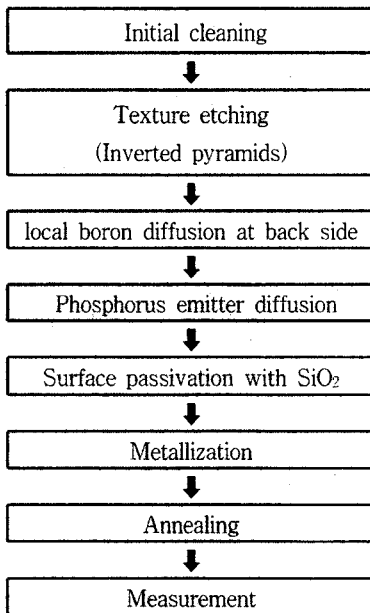


그림 3. PERL 태양전지의 제작흐름도
Fig 3. Fabrication sequence of PERL solar cell

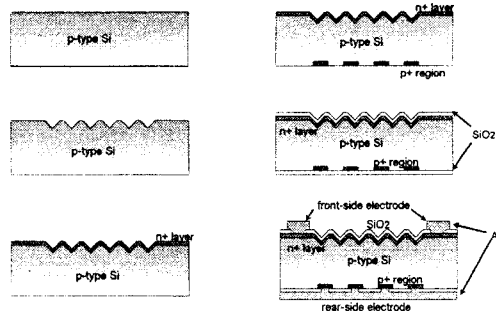


그림 4. PERL 태양전지의 제작공정도
Fig 4. Schematic diagrams of fabrication procedure of PERL solar cell

인 주입후 양면에 n⁺과 p⁺을 확산시킨 후 원격 PECVD(plasma enhancement chemical vapor deposition) 을 사용하여 SiO₂로 passivation막과 반사방지막을 형성하였고, 전면전극 및 후면의 BSF (back surface field)층을 형성하였다. 전극으로는 Al을 thermal evaporation 으로 양면에 증착하였다. 열처리 는 450 °C의 질소 분위기상태에서 30분간 실시하였다. 그림 3과 그림 4에 PERL 태양전지의 제조공정을 나타 내었고 그림 5는 전후면의 전극 모양을 나타내었다. 이 때 전극의 종류는 평거의 형태인 그림 5(a),(b)와 본 연구에서 변형된 모양인 그림 5(c),(d) 형태로 마스크를 제작하고 이때의 효율을 측정하였다.

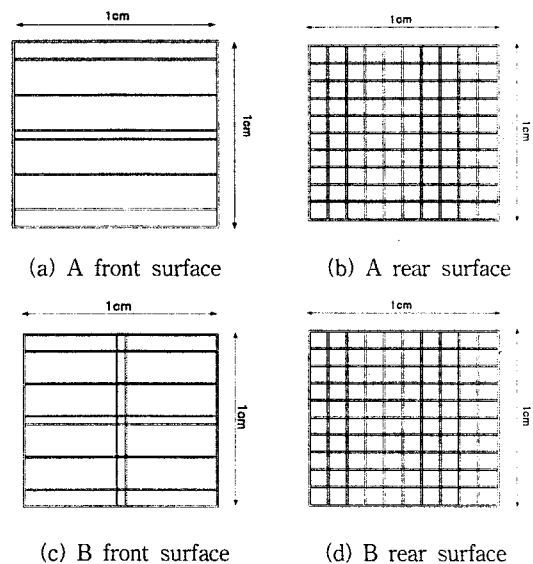


그림 5. 전극형태의 emulsion 마스크
Fig 5. Emulsion mask for grid formation

제작된 소자는 전자현미경으로 예칭된 표면상태를 관찰하였고, UV-visible spectrophotometer (Shimadzu UV-1601)를 이용하여 연마된 표면과 texture한 실리콘 표면의 광투과도를 측정하였고, TLM(transmission line methods)을 사용하여 접촉저항률을 측정하였다. 그림 6는 TLM의 mask 형태이다.

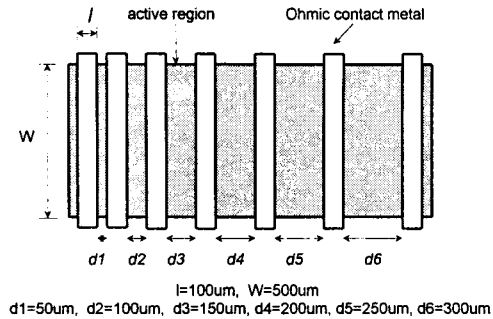


그림 6. 접촉저항측정을 위한 TLM 패턴

Fig 6. TLM patterns for measurement of contact resistance.

단결정 실리콘 태양전지의 광전 변환 효율(η)을 계산하였다. 광전변환효율 η 는 다음과 같이 입사에너지에 대한 단위 면적당 최대 출력에너지의 비로서 정의된다.

$$F.F = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}}$$

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{input}} = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot F.F}{P_{input}}$$

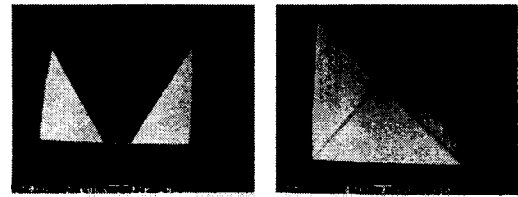
여기서 I_{sc} 는 단락전류(short-circuit current), V_{oc} 는 개방전압(open-circuit voltage)이고, I_m 과 V_m 은 최대출력을 나타내는 점에 대응되는 전류 및 전압값이며, F.F는 충실도(fill factor)이다.

최대출력 전기에너지 P_{max} 을 구하기 위해서는 태양전지의 광전류-전압 특성 곡선이 필요하며, 광원으로는 태양광 스펙트럼(100 mW/cm²)과 비슷한 텅스텐 할로젠 램프를 사용하였다. 그리고 I-V 측정기기로서는 HP4145B를 사용하여 AM 1.5 조건하에서 광전변환효율을 측정하였다.

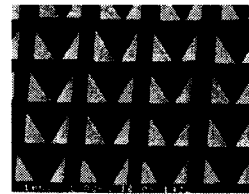
3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 n⁺p 접합을 형성하기 전에 실리콘

wafer 표면에서 태양광의 반사를 감소시키고 빛의 흡수를 증가시키기 위해서 texture etching을 행하였다. texture etching을 하기 전 실리콘 표면은 태양광의 30%정도를 반사시키는 반면에 texture etching을 한 후에는 태양광의 반사가 약 10% 정도까지 감소하여^[11] 단락전류밀도(J_{sc})를 향상시키고 광전변환효율을 높일 수 있다. 그림 7은 KOH를 사용하여 역피라미드로 예칭한 소자의 표면을 관찰한 SEM 사진이다.



(a) ($\times 3000$, 45° tilted) (b) ($\times 3000$, top)



(c) ($\times 1000$, 45° tilted)

그림 7. 역피라미드로 예칭된 표면의 전자현미경사진

Fig 7. Inverted pyramidal textured surfaces photographed by SEM

그림 7(a)와(c)는 시편을 45°로 기울여 본 표면상태이고 그림 7(b)는 수직에서 본 표면상태이다. 여기서 예칭된 역피라미드의 크기는 10~20 μm 정도이다.

실리콘의 texture etching시 중요한 변수중의 하나는 결정면에서의 원자밀도이며, (111)면과 (100)면의 원자밀도는 각각 $15.66 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 와 $6.78 \times 10^{14} / \text{cm}^2$ 로서 (111)면이 (100)면에 비해 조밀 층전면이므로 (100)면의 etching 속도는 (111)면보다 더 빠르다.^[12] 따라서 실리콘 wafer 표면에 (100)면 사이의 각도가 54.74°인 V-groove가 형성되어 태양광의 흡수를 증가시키고 반사를 감소시킴으로써 광전변환 효율을 향상시킬 수 있었다.

그림 8은 표면이 textured 된 실리콘 표면과 연마된 실리콘 표면의 광투과도를 반사율과 파장의 관계로 나타내고 있다. 여기에서 polished 실리콘 표면은 태양광의 40%을 반사시키는 반면에 textured 실리콘 소자

에 반사방지막을 입힌 표면은 5%이하로 반사시킨다.

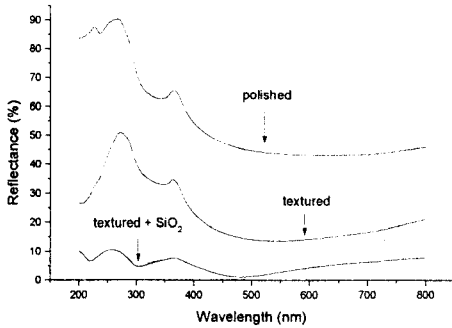


그림 8. 에칭된 실리콘표면과 연마된 실리콘 표면의 반사율과 파장의 관계

Fig 8. Reflectance versus wavelength of the textured-Si structure and polished silicon wafers.

빛의 반사를 감소시키기 위해서는 반사방지막의 표면에서 반사되는 빛과 실리콘 표면에서 반사되는 빛이 서로 상쇄간섭을 일으켜야 한다. 이 간섭조건은 다음식과^[13] 같으며, 반사방지막은 원격 PECVD로 성장시켰고^[14], 그 조건을 표 2에 나타내었다.

표 2. SiO₂ 박막의 증착조건

Table 2. The deposition conditions of SiO₂ thin film.

Conditions	Value
N ₂ O/SiH ₄ flow ratio	11
N ₂ O partial press	220 mTorr
Total	240 mTorr
RF power	40 Watt
Substrate temperature	110 °C

반사방지막인 SiO₂의 굴절율이 1.46이므로 선택 파장이 4000 Å에서 8000 Å일 때 반사방지막의 최적두께는 680 Å~1370 Å 정도가 된다.

$$n \cdot d = \frac{\lambda}{4}$$

여기서 n, d, 및 λ는 각각 반사방지막의 굴절율, 반사방지막의 두께 그리고 입사광의 파장이다. 반사방지막의 두께가 약 800 Å일때 반사율과 파장의 관계를 그림 8에 나타내었다.

전면의 n⁺층과 전극의 접촉저항은 TLM 방식으로 측정했고, 접촉저항 Rc는 1.1 Ω이고, 접촉저항률 ρ는 5×10⁻⁴ Ω·cm였다. 그림 9에는 전체 저항과 TLM pattern과의 상관관계를 나타내었다.

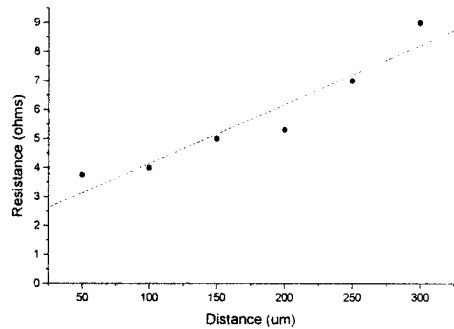


그림 9. 전체 저항과 TLM 패턴과의 상관관계

Fig 9. Plot of total resistance vs. distance between TLM patterns.

pn 접합을 위해 n⁺과 p⁺을 도핑하였다. 앞면에 n⁺ 도핑한 비저항은 Hall measurement 장치로 측정한 결과 비저항은 drive-in 시간이 10분, 15분, 20분, 25분, 30분일 경우 각각 6.5, 15, 53, 245, 및 368 Ω/□로 나타났다. 이때 확산 시간이 25분이상 되었을 때 비저항이 급격히 증가하는 것을 알 수 있었다. 표 3과 그림 10은 도핑시간에 따른 비저항값을 나타내고 있다.

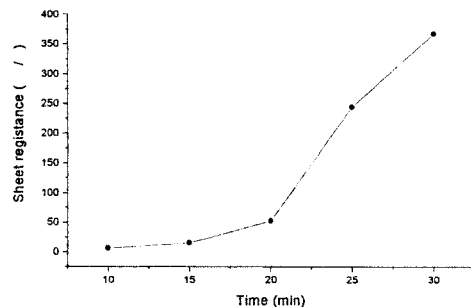


그림 10. 도핑시간에 따른 비저항값의 관계

Fig 10. Sheet resistance on diffusion time

표 3. 도핑시간에 따른 비저항값

Table 3. Sheet resistance on diffusion time

Time(min)	10	15	20	25	30
sheet resistance(Ω/\square)	6.5	15	53	245	368

또 본 연구에서는 이때 농도의 분포를 반도체 시뮬레이션인 Silvaco로 계산한 이론치와 실험치를 비교해보았다. 그림 11은 n⁺ 확산공정을 시뮬레이션 하였을 때의 농도 변화 분포를 나타낸 것이다. 이때의 표면 농도는 $2.5 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 으로 나타났고, pn 접합깊이는 0.8 μm 에서 발생하였다. 측정치의 농도는 $1.33 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 로 거의 이론치와 비슷하게 나타났다.

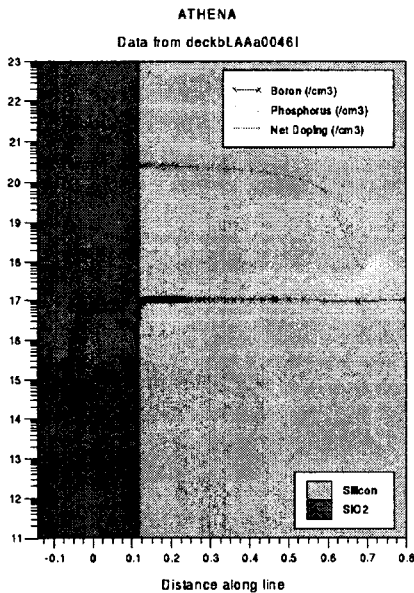


그림 11. n⁺ 도핑하였을때의 농도분포 시뮬레이션

Fig 11. Simulation for the concentration distribution of n⁺ doping

PERL 태양전지를 제조한 후, AM(air mass) 1.5 조건하에서 1 cm^2 의 면적을 갖는 cell에서 입사되는 빛의 세기가 $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 인 경우 A cell의 단락전류(I_{sc}), 개방전압(V_{oc}), 충실도(fill factor) 그리고 광전변환효율은 40 mA, 0.6 V, 0.63 그리고 15.1 %로 각각 측정되었고, B cell의 단락전류(I_{sc}), 개방전압(V_{oc}), 충실도(fill

factor) 그리고 광전변환효율은 43 mA, 0.6 V, 0.62 그리고 15.1 %로 각각 측정되었다. 표 4와 그림 12에 I-V 측정값을 나타내었다.

표 4. PERL Cell의 농도와 비저항 및 I-V 특성

Table 4. I-V, concentration and resistance of PERL cell

AM1.5 spectrum $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$, 1 cm^2 solar cell area						
	Coeff. ($/\text{cm}^3$)	Voc (V)	Jsc (mA/cm^2)	F.F	Rs (Ω/\square)	Eff (%)
A Cell	1.31×10^{20}	0.6	40	0.63	6.4	15.1
B Cell	1.33×10^{20}	0.6	43	0.62	6.5	16.0

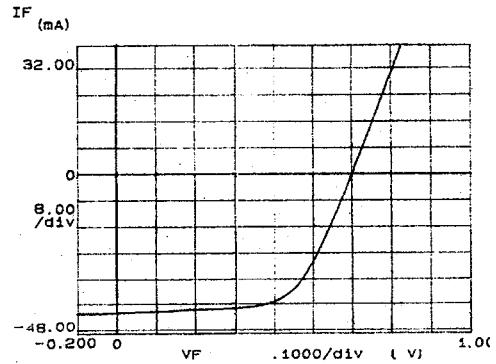


그림 12. PERL 태양전지의 I-V 특성

Fig 12. PERL solar-cell current versus voltage

4. 결론

PERL방식을 사용하여 $0.1 \sim 2 \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항을 갖는 (100) p형실리콘 기판으로 n⁺/p/p⁺ 접합의 태양전지를 제작하였다. KOH을 사용한 역피라미드 모양으로의 에칭, 인과 붕소의 도핑, 반사방지막과 전극의 증착, 열처리 등의 공정을 행하였다.

KOH을 사용한 texture etching후 cell 표면의 광반사율은 거의 5 %이하에 불과하여 좀더 나은 광효율을 낼 수 있었다. n⁺p의 확산조건은 1050 $^{\circ}\text{C}$ 에서 drive-in 시간의 변화를 주어서 확산시켰을 때, 확산 시간이 10분일 경우 비저항이 $6.5 \Omega/\square$ 로 가장 낮았고, 이때의 표면농도는 $1.33 \times 10^{20} / \text{cm}^3$, 접촉저항률 ρ 는 $5 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 이었다. 그리고 전극의 형태에 대한 광효율은

용융된 평거형태의 모양이 더 높은 전류가 발생하여 보다 좋은 광전 변환 효율을 나타내었다. 이때 제작된 PERL Cell은 AM(air mass) 1.5 조건하에서 단락전류가 43 mA, 개방전압은 0.6 V, 충실도는 0.62로 측정되었고, 16 %의 광전변환효율을 얻을 수 있었다.

단결정 실리콘 태양전지는 저비용과 고효율에 대한 계속적인 연구개발로 앞으로도 태양전지 자동차, 인공 위성, 휴대용 전자기기 등 고효율이 요구되는 분야에서 수요가 계속 증가할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] D.M. Chapin, C.S. Fuller and G.L. Pearson : J. Appl. Phys., 25 (1954) 676
- [2] M. A. Green, Semicond. Sci. Technol. , Vol. 8, 1993, pl
- [3] M. A. Green, A. W. Blaker, S. R. Wenham, S. Narayanan, M. R. Willison, M. Taouk and T. Szpitalak, 18th IEEE PVSC, 1985, p61
- [4] Photovoltaic News, Vol. 14, February 1995, p4
- [5] I. B. Kang, M. R. Haskard, N. D. Samaan, Sensor and Actuators, A 62, 1997, p646
- [6] J. Zhao, A. Wang, P. P. Altermatt, S. R. Wenham and M. A. Green, First WCPEC, Hawaii, 1994, p147.7
- [7] J. P. Ponpon, J. Appl. Phys. 47: 3248, (1976)
- [8] A. W Blakers and M. A. Green, Appl. Phys. Letter 39: 483, (1981)
- [9] P. Campbell, S. R. Wenham, and M. A. Green, "Light trapping and reflection control with tilted pyramids and grooves," in *Conf. Rec 20th IEEE Photovolt. Special Conf.* (Las Vegas, NV), Sept. 1988, p.713
- [10] 김동환, "Al₂O₃ 절연막을 이용한 Depletion-mode n-channel GaAs MOSFET의 제조", 경북대학교 석사학위 논문, 1998
- [11] J. G. Haynos : International Conference Record of Photovoltaic Power Generation, (1974) 487
- [12] L .D. Dyer : J. Crystal Growth, 47 (1979) 533
- [13] R. A. Arndt, J. F. Allision, J. G. Haynos and A.Meulenberg : *proc. 11th IEEE photovoltaic specialists Conf., (1975) 40*
- [14] Cho. J. Y., Choi. S. Y. "The fabrications and characteristics of infrared photodiodes in InSb", *The 4th International conference on electronic materials 1998, p. 91*

著 者 紹 介

권오준

『센서학회지 제8권 제2호』 논문99-8-2-16 p.114 참조.
 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정,
 (주) 에티스 대표이사,

남기홍

『센서학회지 제4권 제2호』 논문 95-4-2-02, p.7 참조
 현재 경일대학교 전자정보공학과 교수

김영우

1971년 2월 1일생. 1998년 대구대학교 전자공학과 졸업 (공학사), 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 석사과정, 주관심분야 : 적외선 센서, 반도체 공정기술

배승춘

『센서학회지 제6권 제1호』 논문 97-6-1-09, p.71 참조
 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정



정훈

1972년 8월 25일생. 1997년 울산대학교 물리학과 졸업(이학사), 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 석사과정, 주관심분야 : 태양전지, 평면 디스플레이, 반도체 공정 기술

박성근

『센서학회지 제6권 제1호』 논문 97-6-1-08, p.62 참조
 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정

김우현

『센서학회지 제8권 제1호』 논문 99-8-1-01, p.15 참조
 현재 경북대학교 산업대학원 전자재료전공 석사과정

권성렬

『센서학회지 제8권 제1호』 논문 99-8-1-01, p.15 참조
 현재 경북대학교 대학원 센서공학과 박사과정

김기완

『센서학회지 제1권 제1호』 논문 92-01, p.8 참조
 현재 경북대학교 전자전기공학부 교수