

SOI 구조 이용한 결정질 규소 태양전지의 최적설계

이강민·김영관
 시립인천대학교 재료공학과

Effect of Design Parameters on the Efficiency of the Solar Cells Fabricated Using SOI Structure

Kang-Min Lee and Young-Kwan Kim
 Dept. of Materials Sci. & Eng., University of Incheon., Incheon 402-749

(1999년 5월 31일 받음, 1999년 7월 23일 최종수정본 받음)

초 록 본 연구에서는 SOI 구조를 이용한 50 μ m 두께의 규소 태양전지의 이용 가능성과 제한사항을 제시하기 위하여, interdigitated contact을 이용한 전극을 형성하도록 전지를 설계한 후 단계별 사진공정을 통해 태양전지를 제조하였다. Bonded SOI wafer를 이용하여 제조된 50 μ m 두께의 결정질 규소 태양전지의 효율은 전극간격이 1100 μ m과 base width가 35 μ m인 경우에서 11.5%로 가장 높은 값을 나타내었다. 또한 실험결과로부터 전면전극을 이용한 태양전지의 구조는 power loss를 최소화하는 최적의 base fraction을 적용하는 것이 필요하며, 전지의 효율은 fill factor에 강한 의존성을 나타내기 때문에 fill factor loss를 최소화하는 설계조건이 필요함을 알 수 있었다.

Abstract The recent important issue in solar cell fabrication is to adopt thin film silicon solar cells on cheap substrates. However, thin cells demand new grid design concept that all the contacts(to the emitter and base) be located on the front surface. Hence, the aim of the investigation presented in this paper was to determine the potential and the basic limitation of the design. With this concept, an interdigitated front grid structure was realized and cells were fabricated through a set of photolithography processes. Confirmed efficiencies of up to 11.5% were achieved on bonded SOI wafers with a cell thickness of 50 μ m in the case of finger spacing more than 1000 μ m and a base width of 35 μ m. It was also shown from the results that the design rules for optimizing the base fraction and reducing the shadowing fraction are noted as an important technique to realize high-efficiency thin silicon solar cells.

1. 서 론

현재 규소 웨이퍼를 이용하여 상용화되고 있는 태양전지는 입사되는 태양광 중 1100nm 이내의 파장영역이 내부로 흡수되고 전지 자체적으로 강도를 유지할 수 있도록 400 μ m 이상의 두께로 제조되고 있다. 그러나 이 두께는 태양광 흡수에 의해 발생된 전하의 확산거리를 초과하기 때문에 광전자가 전극으로 도달할 확률이 상당히 감소되어 광전 변환 효율을 증가시키는 데에 제한점으로 작용한다. 따라서, screen printing에 의한 저가의 생산공정을 적용하고 있음에도, 전력대비 생산비용이 화석원료에 비해 상당히 고가이므로 규소 태양전지의 응용범위를 제한하고 있다. 따라서, 무엇보다 태양전지의 두께를 광과장 영역의 광 흡수로부터 발생하는 광전자의 확산거리 이내인 100 μ m 이하로 감소시키는 것이 필요하며 이로 인해 최근에는 박막 규소 태양전지를 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있는데, 박막으로 태양전지를 제조하는 경우 재료내부의 확산거리가 상대적으로 짧은 저 순도의 재료를 이용할 수 있고, 또한 결정질 규소 재료의 사용량도 상당히 감소시킬 수 있기 때문에 효율과 제조비용 면에서 상당한 장점으로 작용할 수 있다.^{1,2)}

전지의 두께를 감소시킴에 따라 기대되는 효율의 향상은

식 (1)에서 나타난 바와 같이 포화전류밀도 (J_0)의 감소에 의해 개방전압 (V_{oc} : open circuit voltage)의 증가에 기인한다.³⁾

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{J_g}{J_0} + 1 \right) \quad (1)$$

위 식에서 k는 Boltzmann constant, T는 온도, q는 전하량, J_g 는 단락전류밀도, J_0 는 포화전류밀도를 나타내며, 포화전류밀도는 아래와 같이 emitter와 base 부분의 합으로 나타낼 수 있다.³⁾

$$J_0 = J_{oc} + J_{ob} \quad (2)$$

$$= \frac{q n_i^2 D_p}{N_b L_p} \cdot \frac{\frac{S_b L_p}{D_p} + \tanh\left(\frac{W_c}{L_p}\right)}{1 + \frac{S_b L_p}{D_p} \tanh\left(\frac{W_c}{L_p}\right)} + \frac{q n_i^2 D_n}{N_b L_n} \cdot \frac{\frac{S_b L_n}{D_n} + \tanh\left(\frac{W_b}{L_n}\right)}{1 + \frac{S_b L_n}{D_n} \tanh\left(\frac{W_b}{L_n}\right)} \quad (3)$$

여기서 각각의 변수에 대한 설명은 참고문헌 [1]에 제시

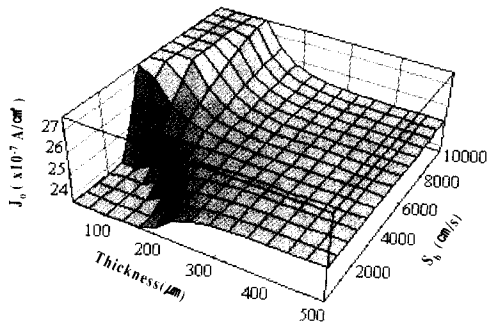


Fig. 1. J_0 as a function of thickness(W_b) and surface recombination velocity(S_b).

Table 1. Parameters for calculation.

N_A (Base doping)	5×10^{15} atoms/cm ³
L_n (Electron diffusion length)	100 μ m
D_n (Electron diffusion constant)	35cm ² /s

되어 있다. 위의 식 (3)에서 보는바와 같이 전지의 두께가 감소하는 경우 포화전류밀도 (J_0)의 base 부분 (J_{0b})이 감소하게됨을 알 수 있고 따라서 개방전압은 증가하게 된다. 그러나 전지 두께가 감소되는 경우 전지 제작에 대한 표면적의 비가 상대적으로 증가하기 때문에 전지 표면에서의 특성이 크게 영향을 미치게 된다. 즉, 표면적의 증가에 의해 광전자가 전지 표면에서 재결합을 일으킬 확률이 증가하기 때문에 J_0 는 두께의 감소와 함께 광전자의 표면 재결합 속도 (S_b)의 변화에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서 이 두 가지 변수에 따른 J_0 의 변화를 예측하기 위하여 식 (4)를 이용하여 전지 두께와 S_b 에 의한 포화전류밀도를 계산한 후 그 결과와 계산에 사용된 parameter를 Fig. 1과 표 1에 각각 나타내었다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 전지의 두께 감소에 의한 포화전류 밀도의 감소는 전송자의 표면 재결합 속도에 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 즉 S_b 가 4000cm/s 이하인 경우에는 전지의 두께가 100 μ m이하로 감소하는 경우 포화전류밀도는 상당히 감소하게 되며, 그 감소 폭은 S_b 가 감소함에 따라 더욱 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 S_b 가 4000cm/s 이상의 경우에서 두께의 감소는 J_0 를 오히려 급격히 증가시키는 결과를 보여준다. 즉, 이것은 전지의 표면적이 증가하면 표면에서의 특성이 태양전지의 특성에 큰 영향을 미치게 되며, 따라서 개방전압을 증가시키기 위해서는 전지후면에서 passivation이 효과적으로 형성될 수 있어야 하고, 동시에 전지의 두께를 100 μ m이하로 감소시키는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다. 즉, 결정질 규소 태양전지의 응용범위를 확대시키기 위해서는 기존에 상용화되고 있는 태양전지를 대체할 수 있는 새로운 전지구조의 도입이 필요하다.

박막으로 태양전지를 제조하기 위해서는 전지의 후면에 효과적으로 passivation 층이 형성되어야 함과 동시에 전지표면으로 입사되는 태양광 중 600nm 이상의 장파장 영

역을 전지 내부로 효과적으로 반사할 수 있어야 하며, Si의 취성을 보완할 수 있는 저가의 기판을 도입하는 것이 필요하다. 이와 같이 전기적, 광학적, 기계적 요구조건을 충족시킬 수 있는 전지구조를 실현하기 위해 가장 적합한 구조는 oxide와 Si 계면에서 나타나는 우수한 특성을 이용하는 silicon-on-insulator (SOI) 구조로서, 특히 저가의 ceramic 기판을 도입하여 Si 태양전지의 광전변환 효율이 가장 높게 나타나는 50 μ m 두께의 Si 활성층이 기판 상부에 위치토록 전지를 제조하는 방법이 주목받고 있다.⁴⁾

그러나, SOI 구조에서 기판은 전지의 기계적 강도를 유지시키고, 규소 활성층을 외부로부터 절연시키는 역할을 하기 때문에, 태양전지의 전극(emitter와 base)이 모두 전지의 전면에 위치시키는 새로운 디자인 개념이 필요하다. 따라서 본 연구는 위의 요구조건을 적용하여 새로운 개념의 태양전지 제조 가능성을 제시하고, 전면전극을 이용하여 SOI구조를 이용한 50 μ m 두께의 결정질 Si 태양전지의 최적설계 조건을 확립하기 위한 목적으로 규소 활성층의 두께 조절이 용이한 bonded wafer를 제조하여 규소 활성층의 두께를 50 μ m로 박막화 하였으며, 제조된 태양전지에서 나타난 특성 값을 기초로 전극(emitter와 base)의 설계방법에 따른 공정변수 및 제한사항을 검토함으로써 저가의 박막 결정질 규소 태양전지 제조를 위한 추후과제를 도출하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 Bonded SOI wafer 제조

C. Hebling 등에 의하면 Si/SiO₂ 계면에서 23° 이상으로 입사되는 태양광의 완전반사를 유도하기 위해서는 SiO₂ 층의 두께가 4000 Å 이상 형성되어야 하는 것으로 보고되고 있다. 따라서 전지 활성층으로 이용될 4-in p-type, 8-10 $\Omega \cdot \text{cm}$, (100)의 Cz wafer 표면에 wet oxidation으로 6000 Å의 산화막을 형성시킨 후, bare wafer와 함께 RCA 1 세척 후 계면에서의 수소결합을 이용하여 self adhesion을 유도하였다.^{5,6)} Bonded wafer 계면에서의 수소결합을 공유결합 형태인 siloxane 결합으로 전환시키기 위해서 1150 °C에서 2시간동안 N₂ 분위기에서 열처리하였으며, 제조된 SOI wafer를 grinding과 polishing으로 전

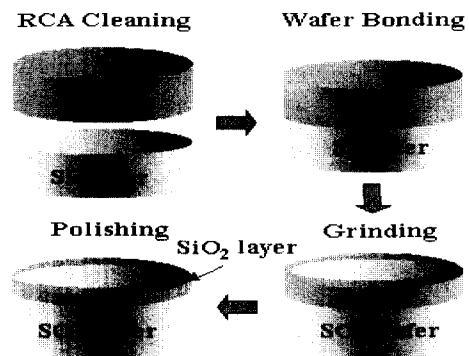


Fig. 2. SOI wafer fabrication process.

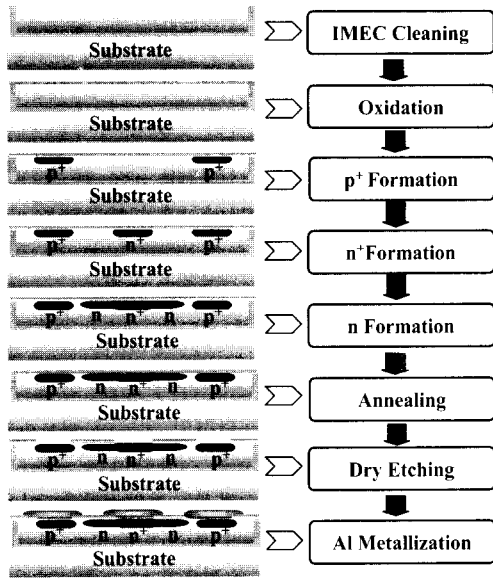


Fig. 3. Solar cell fabrication process.

지 표면의 두께를 50 μm 만 남도록 제거하였다. SOI wafer 제조공정을 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 태양전지 제조공정

제조된 SOI wafer를 이용하여 태양전지를 제조하기 위하여 CADENCE layout program을 이용하여 전지를 설계하여 5-in mask로 제조하였으며, 각 공정은 단계별 사진공정을 통해 진행되었다. 단계별 공정순서는 Fig. 3과 같다.

제조된 SOI wafer는 금속 불순물을 제거하기 위해 IMEC cleaning을 거친 후 전지 상부 표면에 passivation 및 이온주입 공정시 mask로 사용하기 위해 400 Å의 산화막을 wet oxidation으로 성장시켰다. 이후 사진공정을 이용하여 base 지역에 이온주입을 통해 p⁻지역을 형성하였으며, 이온 주입농도는 태양전지 제조시 요구되는 낮은 면저항 값으로 형성하기 위해서 이온주입기의 상한선인 10¹⁴/cm²로 설정하였다. 다음에 사진공정을 거친 후 emitter 지역에 이온주입을 통해 n⁻와 n지역을 형성하였으며, 이때의 이온 주입량은 각각 5×10¹⁴/cm² 과 2×10¹⁴/cm² 이었다. 이

온주입 에너지는 10KeV 이하로 낮추는 것이 태양전지의 제조공정에 적합한 것으로 알려지고 있으나, 이용된 장비의 하한인 35KeV의 에너지로 주입하였다.⁷⁾ 이온주입 공정을 거친 후 규소 활성층의 결정성을 회복하고, p-n junction을 형성시키기 위하여 900℃에서 30분간 열처리를 추가로 실행하였다. Emitter와 base 사이의 거리는 1100 μm 로 설정하였으며, 전지표면에 형성되는 base의 넓이는 25~40 μm 의 각각 다른 값을 갖도록 설계된 마스크를 적용하여 제조하였다. 추가적인 사진공정을 거친 후 전극이 형성될 부분의 산화막을 제거하였으며, sputtering 공정으로 Al을 1.5 μm 성장시킨 후, 마지막으로 사진공정을 통해 emitter와 base 지역을 제외한 부분을 dry etching으로 제거하였다. 금속전극은 20 μm 의 넓이를 갖도록 디자인하였으며, 마지막으로 400℃에서 30분간 소결하였다. 제조된 태양전지의 총 면적은 1cm²이었으며, 위의 공정으로 제조된 태양전지의 구조를 Fig. 4에 나타내었다. 태양전지의 특성은 유사 광원을 이용하여 AM 1.5 (100mW/cm²) 상태에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 박막 규소 태양전지의 특성

처음으로 제작된 태양전지는 base width가 30 μm 로서, Al 전극에 의한 규소 활성층의 SF (shadowing fraction)이 각각 다른 전지를 제조하였으며, interdigitated contact 구조를 갖는 실제 소자의 grid와 bus bar 부분의 광학 사진을 Fig. 5에 나타냈다. I-V measurement로 측정된 전지의 parameter는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 박막 태양전지의 효율값(η)은 Al 전극에 의한 SF이 9.7%인 전지에서 10.9% (I_{sc} : 21.9mA, V_{oc} : 506mV, FF: 65.6%)로 가장 높게 나타났다. 이것은 전극에 의한 SF이 감소함에 따라 shadowing loss에 의한 영향을 최소화 할 수 있기 때문에, 결과에서 나타난 것과 같이 단락전류(J_{sc})와 개방전압(V_{oc}) 및 충전율(fill Factor)의 증가에 기인한 것이다. 그러나 SF이 8.9%인 경우, shadowing loss의 감소에 의해 FF (Fill Factor)는 66.7%로 SF이 9.7%인 경우보다 1.7% 증가하는 반면 I_{sc} 와 V_{oc} 는 각각 4.3%, 2.4% 감소하였기 때문에 효율은 6.4% 감소하는 결과를 나타내었다. 즉,

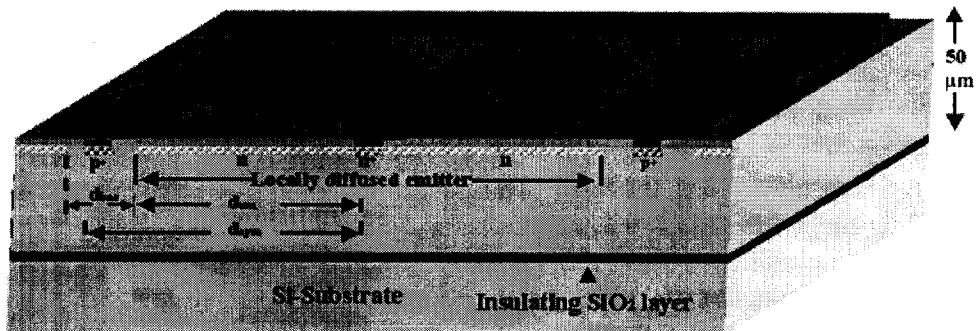


Fig. 4. Structure of interdigitated front contact cell.

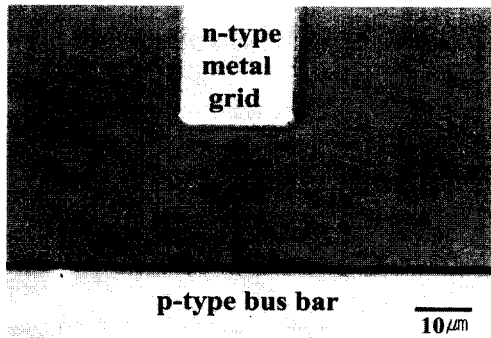


Fig. 5. Photograph of front surface with a n-type metal grid and p-type bus bar.

이것은 SF가 8.9%까지 감소되는 경우 shadowing loss의 영향에 의한 FF loss를 최소화할 수 있음이 확인된 반면, I_{sc} 와 V_{oc} 의 감소현상은 SF의 변화에 의한 전지 특성값의 영향 외에 다른 요소가 존재함을 의미한다. 즉, 이것은 interdigitated contact structure를 이용하여 모든 전극 (emitter와 base)이 전지의 상부에 위치하는 경우에는 각각의 전극이 전지의 상·하부에 위치하는 기존의 전지에서와 달리 전지 상부에서의 base의 규격에 따른 전지 특성값의 변화를 고려해 볼 필요가 있음을 의미한다.

3.2 Base width (d_{bas}) 변화에 따른 전지 특성 변화

Fig. 6에서 나타난 결과와 같이 금속전극에 의한 SF는 9.7%일 때 전지의 효율은 최대값을 나타냈으나 이것은 d_{bas} (base width)의 변화를 고려하지 않고 30 μm 로 고정된 경우였다. 따라서 전극의 SF를 9.7%로 유지한 상태에서 d_{bas} 가 25~40 μm 로 각각 다른 전지를 제조하여 전지의 특성값을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 전지의 I_{sc} 와 V_{oc} 는 d_{bas} 가 30 μm 일 때 각각 최대 값을 나타내었고, FF는 이와는 달리 35 μm 인 경우에서 67.9%로 가장 높은 값을 나타내었다. 전지의 효율은 d_{bas} 가 35 μm 인 경우에서 11.1% (I_{sc} : 25.34 mA, V_{oc} : 576mV, FF: 67.9%)로 가장 높은 값을 나타내었는데 이것은 d_{bas} 가 30 μm 에서 35 μm 로 증가함에 따라 I_{sc} 는 25.5mA에서 25.3mA로 0.8%, V_{oc} 는 579mV에서 576mV로 0.5%의 미세한 감소현상을 나타낸 반면, FF는 3.2% 증가함에 기인한 것이다.

즉, 앞 절에서 언급된 바와 같이 SF의 변화에 따른 전지의 효율은 I_{sc} 와 V_{oc} 가 가장 높은 경우에 최고치를 나타내는 반면, base 부분이 전지의 상부에 위치하는 경우 d_{bas} 의 변화에 따른 전지의 효율은 FF가 가장 높은 값을 나타내는 경우에 최고치를 나타내었기 때문에 d_{bas} 의 변화는 I_{sc} 와 V_{oc} 에 비해 FF에 급격한 변화를 야기시키는 것으로 해석할 수 있다.

따라서, 이와 같은 결과에 대한 정성적인 해석을 위해, 식 1을 이용하여 d_{bas} 에 따른 J_0 를 계산하였으며, 계산된 J_0 과 FF에 영향을 미치는 최대출력 (P_m)과 비교하여 보았으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 J_0 는 d_{bas} 가 30~35 μm 인 경우 가장 낮은 값을 나타

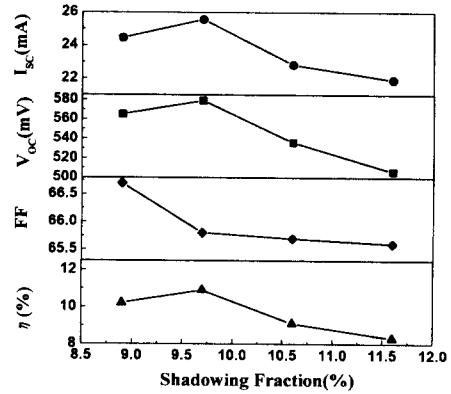


Fig. 6. Solar cell parameters with shadowing fraction ($d_{bas}=30 \mu\text{m}$).

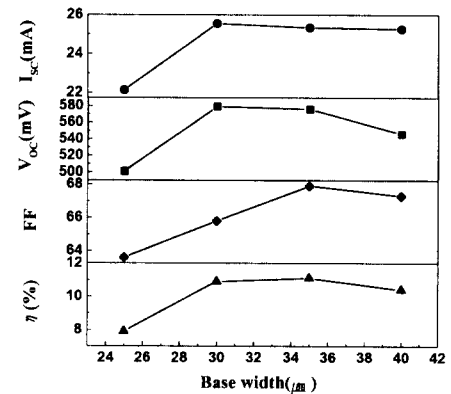


Fig. 7. Solar cell parameters with base width (SF=9.7%).

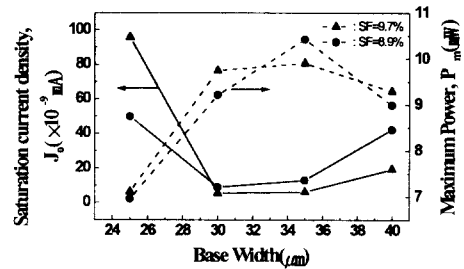


Fig. 8. The saturation current density (J_0) calculated from eq. (1) and maximum power (P_m) with base width.

내었고, 이와는 대조적인 결과로서 P_m 은 J_0 가 가장 낮은 값을 나타내는 35 μm 의 d_{bas} 에서 가장 높은 값을 나타내었다. 이것은 J_0 가 낮아짐에 따라 FF loss가 감소됨을 의미하는 것이며, 또한 FF loss가 최소화되는 특정 d_{bas} 가 나타남을 보여주고 있다.

기존의 연구에서 알려진 바와 같이, 전지의 상부 표면에 위치하는 base의 fraction이 증가하는 경우, 광전자의 재결합에 의한 recombination loss가 증가하는 것으로 알려져 있는데,⁵⁾ Fig. 8의 결과로부터 recombination loss는 d_{bas} 가 35 μm 이상에서 증가하기 시작하는 것으로 판단할 수 있다. 또한 d_{bas} 가 30 μm 이하에서는 J_0 의 급격한 증가현상이 나타나는데 이것은 base fraction의 감소에 leakage current가 증가함에 기인한 것으로 판단할 수 있다. 따라서 P_m

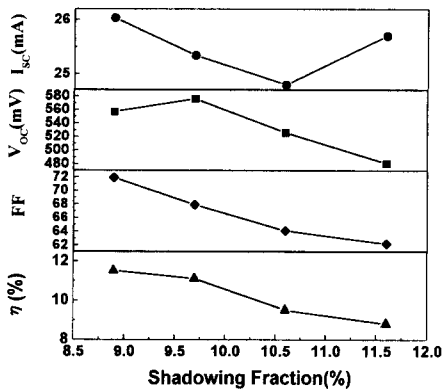


Fig. 9. Solar cell parameters with shadowing fraction(d_{bas}=35 μm).

과 FF는 recombination과 leakage current에 의한 loss factor가 최소화되는 35μm의 d_{bas}에서 가장 높은 값을 나타내었으며, base fraction(d_{bas}/d_{em})의 최적값은 0.03임을 알 수 있다.

3.3 Shadowing fraction 변화에 따른 전지 특성 변화

앞에서 나타난 결과로부터 base fraction의 최적 값이 0.03(d_{bas}=35μm)인 경우에는 SF에 따른 전지의 특성값 변화는 Fig. 6과는 달리 Fig. 9에서 보는 바와 같이 SF가 9.7%에서 8.9% 감소되는 경우에도 효율값은 FF의 증가에 비례하여 11.5% (I_{sc}: 26.0mA, V_{oc}: 557mV, FF: 71.9%)로 가장 높은 값을 나타내었다. 이것은 base fraction 변화에 따른 power loss factor가 최소화되어 효율은 I_{sc}와 V_{oc}에 의한 영향보다 shadowing loss가 감소됨에 따라 증가하는 FF에 더욱 의존하여 증가하기 때문이다. 따라서, interdigitated 구조를 이용하는 규소 태양전지의 효율을 향상시키기 위해서는 FF loss factor를 더욱 감소시키는 가장 중요한 요소임을 알 수 있다.

3.4 Unit effective series resistance effect on Fill Factor

태양전지의 FF는 전지의 구조 및 규격에 따라 복합적으로 발생하는 series resistance(R_s)에 의해 FF loss를 유발한다. 즉, FF loss를 감소시키기 위해서는 R_s를 최소화 할 수 있도록 전지를 설계하는 것이 필요하다. 특히, 전지설계 측면에서 R_s에 가장 큰 영향을 나타내는 요소는 front grid structure에 의해 발생하는 R_g(unit effective series resistance)로서, grid의 길이와 전극간격에 의해 아래의 식 (4)로 표현된다.⁸⁾

$$R_g = \left[\frac{1}{12} \frac{a}{b} - \left(\frac{a}{b} \right)^2 \frac{8}{\pi^2} \right. \\ \left. \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1)^{-5} \tanh(2m+1) \pi \frac{b}{a} \right] \frac{\rho}{t} \quad (4)$$

여기서 a는 전극사이의 간격, b는 grid의 길이, ρ/t는 규소 활성층의 면저항을 나타낸다. 위의 식(4)를 이용하여 제조된 전지의 SF에 따른 R_g를 계산해 본 결과 Fig. 10에서 보는 바와 같이 전지의 SF가 감소함에 따라 R_g는 선형

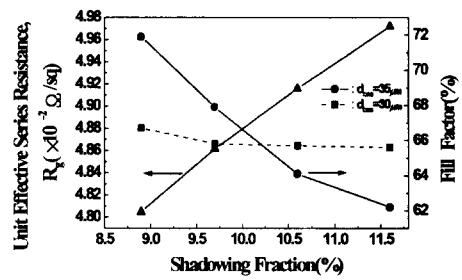


Fig. 10. Unit effective series resistance(R_g) and fill factor(EF) with SF.

으로 감소하게 되는 것을 알 수 있다. 즉, 이것은 전지의 FF loss의 감소를 의미하는 것으로 d_{bas}가 35μm인 경우 FF는 SF가 감소함에 따라 증가함을 알 수 있다. 그러나 d_{bas}가 30μm인 경우에는 앞 절에서 언급한 바와 같이, base fraction 감소에 의한 power loss factor가 작용하여, SF가 10% 이하의 범위에서 FF는 d_{bas}가 35μm인 경우보다 낮은 값을 나타내었고, 또한 SF의 감소에 따른 FF의 변화는 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

따라서, interdigitated grid contact structure를 이용한 결정질 규소 태양전지의 효율은 base fraction이 0.03으로 형성되도록 d_{bas} 및 d_{em}의 규격을 설정하고, 동시에 SF를 9% 이하로 감소하도록 전극을 설계함으로써 11.5% 이상으로 더욱 증가시킬 수 있을 것으로 기대되며, 이것은 전지 설계에 따른 FF loss의 최소화 요구조건을 해결하는 설계개념으로 적용될 수 있다.

본 연구에서 측정된 태양전지의 특성 값은 현재 국·내외에서 상용화되고 있는 태양전지의 효율값(13~16%)과 차이를 나타내었는데,⁹⁾ 이것은 결정질 Si 태양전지 제조시 필요한 texture etching, antireflection coating 및 back surface field 등의 공정을 적용하지 않았기 때문이다. 또한 emitter 및 base 형성시 이온 주입량의 한계에 의해 emitter와 base 지역의 면저항의 최적 값은 n⁻ 지역에서 20~30Ω/sq, n 지역에서 100~200Ω/sq이고, p⁻ 지역에서는 10~20Ω/sq으로 TSUPREM 프로그램을 이용하여 모사해 본 결과 이와 같은 면저항 값을 얻어내기 위해서는 n⁻와 n-type의 double emitter 지역에 각각 7×10¹⁵/cm²과 7×10¹⁴/cm²의 이온주입이 필요하나, 본 실험에 이용된 장비의 제한사항으로 제조된 전지의 emitter에서의 면저항 값은 371Ω/sq와 170Ω/sq로 높은 값을 나타내었다.⁵⁾ 따라서, 불순물의 농도를 증가시키기 위해서는 이온주입 공정보다는 기체나 고체 source를 이용한 doping 공정의 적용이 도입이 효과적이라 할 수 있다.

이와 같이 전지설계 조건의 최적화와 더불어 제조공정의 전환을 통해 15% 이상의 효율이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고효율 특성과 생산비용의 절감을 위해 필요한 박막 규소 태양전지의 적용 가능성을 제시하기 위해 전면전극을 이용한 50μm 두께의 박막 규소 결정질 규소 태

양전지를 SOI 구조를 적용하여 제조하였으며, 금속전극의 shadowing fraction이 8.9%이고 base fraction이 0.03 ($d_{\text{bas}}=35\mu\text{m}$)인 전지에서 11.5%의 가장 높은 효율을 얻어냈다. 그러나 전지 제조과정상의 제한사항을 해결하고 규소 활성층의 texturing 및 BSF층의 적용으로 5% 이상의 효율 증가를 기대할 수 있을 것으로 기대되며, 특히 본 연구에서 적용된 $1000\mu\text{m}$ 이상의 전극간격은 screen printing의 적용 가능성을 제시해 주는 결과이다.

전면전극을 이용한 태양전지의 효율은 fill factor의 변화에 강한 의존성을 나타내었고, 특히 fill factor loss를 유발하는 unit effective series resistance는 fill factor를 감소시키는 중요한 요소임을 알 수 있었다. 따라서, 전면전극의 최적설계조건은 unit effective series resistance를 감소시킬 수 있도록 전지의 shadowing fraction을 9%이하로 형성시키는 것과 포화전류밀도가 최소화되는 특정 d_{bas} 를 적용하는 것이 중요 요소임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국 에너지 관리공단 학술진흥 사업의 지원에 의해 수행되어졌으며, 공정진행을 지원한 서울대 반도체 공동 연구소에 감사드립니다

참고 문헌

1. A. Hovinen, Physica Scripta, Vol. **T69**, pp. 167-169 (1997).
2. Hidetaka Takato and Toshihiro Sekigawa, Jpn. J. Apply. Phy Vol. **34**, pp. 6358-6363 (1995).
3. Ajeet Rohati and members, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. **ED-33**, No. 1, pp. 1-7 Jan (1986).
4. C.J.J. Tool, J.A.M van Roosmalen, S.E.A. Schiemiery, R.C. Huiberts, G.M. Christie, and W.C. Sinke, ECN Report.
5. C. Hebling, S.W. Glunz, C. Schetter, J. Knobloch, and A. Rauber, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. **48**, pp. 335-342 (1997).
6. Q. Y. Tang and U. Gosele, J. Electrochem. Soc, Vol. **143**, No. 5, pp. 1773-1779 (1996).
7. Andrei P. Silard, Solar Cells, Vol. **15**, pp. 211-233 (1985).
8. Kasturi Lal Chopra, Suhit Ranjan Das, *Thin Film Solar Cells*, 1st ed., pp. 521-523, Plenum Press, New york. USA, (1983).
9. Jozef Szlufcik, Johan F. Nijs and Roger Van Overstraeten, Proceedings of the IEEE, Vol. **85**, No. 5, pp. 711-730 (1997).