

선택적 에미터를 적용한 고효율 결정질 실리콘 태양전지 구조 설계

임 종근¹⁾, 이 원재²⁾, 문 인식³⁾, 오 훈⁴⁾, 조 은철⁵⁾

Design analysis of high efficiency crystalline silicon solar cell using the selective emitter

Jong-keun Lim, Won-Jae Lee, In-Sik Moon, Hoon Oh, Eun-Chel Cho

Abstract : This paper presents the technology of selective emitter for high efficiency crystalline silicon solar cell. The effect of selective emitter is analyzed by using the simulation program for solar cell, PC1D. The selective emitter shows better spectral response in short wavelength regions compared to homogeneous emitter. Therefore, the efficiency of solar cell with selective emitter can be improved by changing the sheet resistance from 60 Ω/\square to 120 Ω/\square . In addition, the power loss of solar cell can be minimized by optimizing width and gap of the finger electrodes on the selective emitter.

Key words : selective emitter(선택적 에미터), solar cell(태양전지), efficiency(변환효율), sheet resistance(면저항), blue response, power loss(전력 손실), electrode(전극)

1. 서 론

현재 태양광 발전의 그리드 패러티 달성을 통한 경쟁력 확보를 위해 다양한 태양전지 고효율화 기술이 연구 개발되고 있다. 그 중 태양전지의 에미터 영역을 선택적으로 도핑하여 빛의 단파장 영역 활용도를 높이는 선택적 에미터 형성 기술은 태양전지 고효율화를 위한 핵심 기술이다. 이에 본 논문은 선택적 에미터의 특징 및 구조, 에미터 면저항 설계값에 따른 효율 변화, 전극 간격 변화에 따른 태양전지 전력 손실을 태양전지 1차원 모델링 프로그램(PC1D)을 이용하여 분석하였다.

수 할 수 있는 파장영역은 1100nm이하이다. 또한, 300nm 이하의 파장영역의 광자들은 태양전지 제조 시 표면의 반사방지막에서 흡수 또는 반사되어 전자와 정공의 형성에 기여하지 못한다. 즉, 결정질 실리콘 태양전지의 이용 가능한 빛의 파장영역은 300nm ~ 1100nm가 된다. 이러한 입사광의 파장별 흡수 깊이(absorption depth, 광 흡수 계수의 역수)는 물질의 광 흡수계수(absorption coefficient)에 의해 달라진다. 그림 1은 결정질 실리콘의 파장별 흡수계수와 흡수거리를 나타낸 것이다.¹⁾ 300nm ~ 500nm 단파장 영역은 1 μ m 이내의 표면에서 흡수되고, 1000nm이상의 장파장 영역은 200 μ m 이상에서 흡수됨을 알 수 있다.

2. 본 론

2.1 선택적 에미터를 적용한 태양전지

2.1.1 결정질 실리콘의 광흡수 특성

태양전지에서 전류가 흐르기 위해서는 특정 밴드 갭 이상의 에너지를 갖는 광자(photon)가 태양전지 내부에서 전자와 정공을 형성하여야 한다. 결정질 실리콘의 밴드 갭은 1.12eV로 이를 파장으로 변환하면 1100nm가 된다. 따라서, 실리콘이 흡

-
- 1) 현대중공업 기계전기연구소 태양광연구실
E-mail : jklim@hhi.co.kr
Tel : (031)289-5016 Fax : (031)289-5020
 - 2) 현대중공업 기계전기연구소 태양광연구실
E-mail : leewj@hhi.co.kr
Tel : (031)289-5012 Fax : (031)289-5020
 - 3) 현대중공업 기계전기연구소 태양광연구실
E-mail : gismoons@hhi.co.kr
Tel : (031)289-5014 Fax : (031)289-5020

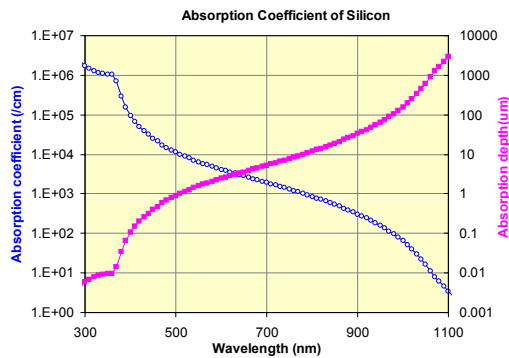


Fig. 1 입사광 파장에 따른 결정질 실리콘의 광흡수 계수와 흡수 거리

2.1.2 태양전지 및 선택적 에미터의 특징

광흡수에 의해 형성된 전자와 정공은 기판 내에서 확산에 의한 이동 중에 p-n 접합 (junction) 면에 형성되는 전기장(electric field)에 의해 전자는 n 층으로 정공은 p 층으로 분리된다. p-n 접합은 p형 불순물인 붕소(B)가 도핑된 p(positive)형 실리콘 기판에 n(negative)형 불순물인 인(P)을 고농도 확산공정으로 도핑하여 형성한다. 이때, 인이 도핑된 층을 에미터(emitter)라 부르는데, 확산공정의 조건(온도와 시간)에 따라 표면농도와 도핑 깊이가 조절된다. 그림 2에서 보듯이 기판의 에미터 층이 균일한 농도와 도핑 깊이를 갖는 것을 균질(homogeneous) 에미터라 하며, 에미터 형성부의 일정 영역(전극 접합부)의 도핑 농도와 도핑 깊이가 다르게 형성된 경우를 선택적(selective) 에미터라고 한다.

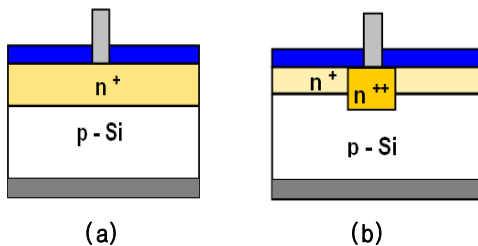


Fig. 2 (a) 균질 에미터 태양전지 구조
(b) 선택적 에미터 태양전지 구조

태양전지 구조에서 에미터는 전자-정공의 분리와 전자가 이동하는 통로로서의 기능을 가지고 있으며, 이동한 전자를 수집하는 전극과의 접합을 형성하게 된다. 입사광에 의해 생성된 전자와 정공은 일정시간(lifetime) 동안만 기판 내에서 이동할 수 있게 되는데, 이때 lifetime은 기판 품질의 지표가 된다. Lifetime 내에 p-n접합부까지 이동하지 못한 전자와 정공은 재결합하여 태양전지의 출력에 기여하지 못하게 되는데, 이를 재결합 손실(recombination loss)이라고 한다. 재결합은 그 원리에 따라 Radiative, Auger, Shockley - Read - Hole(SRH) 재결합으로 나뉘게 된다. 실리콘

태양전지에서 도핑농도에 영향을 받는 Auger 재결합과 결정결함 및 금속 불순물에 영향을 받는 SRH 재결합이 전지의 출력특성을 결정하는 주요 재결합 손실 요인이 된다.²⁾ Auger 재결합은 도핑농도가 높을수록 커지게 되는데, 특히 인이 도핑된 에미터 층에서의 손실이 커지므로 에미터 층은 저농도로 도핑하는 것이 재결합 손실을 줄이는 방법이다. SRH 재결합은 기판의 결정결함과 금속 불순물의 영향을 받게 되는데, 단결정 기판은 불순물의 유입 가능성이 작고, 제조공정에서 결정결함의 발생이 적어 재결합 손실이 작게 된다. 또한, 실리콘 표면에서는 실리콘 결정구조가 깨어진 계면으로 인한 재결합 손실이 커지는데, 이를 표면 재결합 (surface recombination)이라고 한다. 이러한 표면 재결합은 실리콘 에칭 정도와 은 확산량에 의해 재결합 정도가 달라진다. 따라서 태양전지 전면 전극 형성부의 에미터 층을 선택적으로 얇게 형성하면 실리콘 에칭이나 은의 확산에 의한 영향을 차단하여 태양전지의 출력특성을 향상시킬 수 있게 된다.

2.2 선택적 에미터의 효과

2.2.1 결정질 실리콘의 광흡수 특성

그림 3은 PC1D 프로그램을 이용하여, 도핑 정도에 따른 양자효율의 변화를 나타내고 있다. 300nm ~ 500nm의 단파장 영역에서 도핑농도가 높을수록 양자효율이 낮음을 알 수 있는데, 이는 고농도 도핑에 의해 표면과 에미터 층에서의 재결합이 증가하기 때문이다.³⁾⁴⁾ 따라서, 재결합 손실을 줄여 전지의 출력을 향상시키기 위해서는 에미터를 저농도로 도핑하여야 함을 알 수 있다.

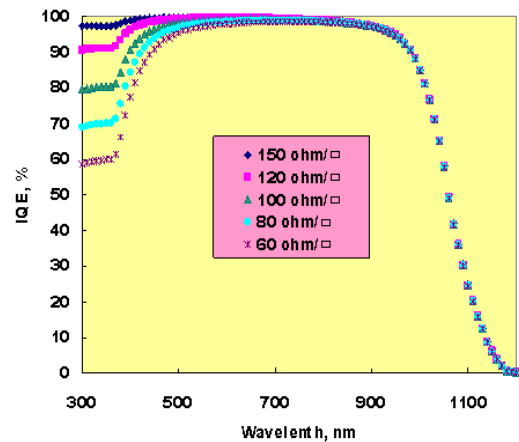


Fig. 3 도핑 정도에 따른 내부 양자 효율 (Internal Quantum Efficiency) 시뮬레이션 결과

저농도로 도핑된 에미터에서 내부 양자효율의 개선에 따른 태양전지 변환효율 향상 효과는 표1과 같다. 에미터의 농도가 낮을수록 내부 양자효율이 개선되어 변환효율이 향상되었다. 면저항 120 Ω/\square 에미터에서 변환효율이 17.4%까지 증가하였고, 이는 기존의 면저항 60 Ω/\square 에미터에 비해 변환효율이 0.8% 향상된 값이다.

Table 1 전지의 양자효율 개선에 따른 효율 개선 시뮬레이션 결과

에미터 면저항	효율	효율향상
60 Ω/□	16.6%	-
80 Ω/□	16.8%	0.2%
100 Ω/□	17.1%	0.5%
120 Ω/□	17.4%	0.8%

2.2.2 접촉저항 및 누설전류 감소

아래의 수식(1)의 관계에 의해 에미터와 금속 전극간의 접촉저항(ρ_c)은 접합부의 도핑 농도(N_D)가 증가할수록 작아진다. 따라서, 전극과의 접촉저항을 최소화하여 전지의 출력을 향상하기 위해서는 전극 접합부를 고농도로 도핑해야 한다.

$$\rho_c = \exp\left(\frac{2\sqrt{\epsilon_s m^*}}{\hbar} \left(\frac{\phi_{Bn}}{\sqrt{N_D}}\right)\right) \quad (1)$$

ρ_c : specific contact resistivity

$\epsilon_s, m^*, \hbar, \phi_{Bn}$: 물질상수

태양전지의 소성 공정에서 에미터의 에칭 정도와 에미터 내부로 확산되는 은(Ag)의 농도는 전극 특성에 큰 영향을 미친다. 그림 4는 도핑 조건에 따른 인(P)의 농도와 소성 공정 조건에 따른 은(Ag)의 농도를 SIMS(Secondary Ion Mass Spectrometry)로 분석한 데이터이다. 60 Ω/□로 도핑된 에미터는 $1 \times 10^{21}/\text{cm}^3$ 의 표면농도와 0.3~0.4 μm의 접합깊이를 갖는다.

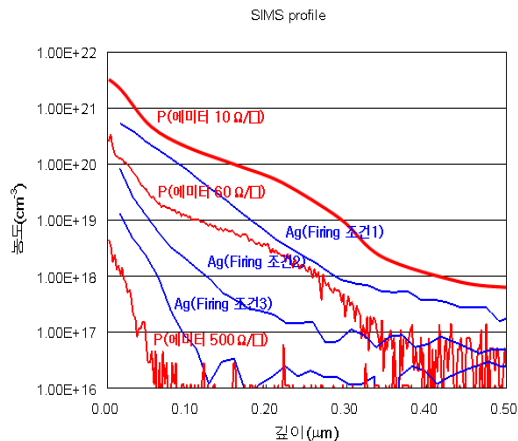


Fig. 4 도핑공정에 따른 P와 소성 공정에 따른 Ag의 확산 SIMS분석

에미터의 p-n 접합부의 계면에는 전계가 형성되며, 이상적으로는 전하의 재결합이 일어나지 않지만, 결정결함이나 금속 불순물이 존재하여 전하의 재결합을 일으키게 되는데, 이때 발생하는 손실을 접합부 누설전류(junction leakage current)라고 한다. 특히 스크린 프린팅 태양전지의 경우, 소성 공정에서 은 페이스트가 에미터 층을 과도하게 에칭하여 p-n 접합부에 결정결함을 형성하거나, 은이 p-n 접합부까지 과량으로 확산하여 재결합 센터로 작용하면 누설전류를 증가시켜 태양전지의 특성을 저하시킬 수 있다. 그림 4에서 10 Ω/□의 에미터 조건과 같이 고농도로 접합 깊이를

깊게 인을 도핑하면 은 페이스트의 과도한 식각이나, 은의 과도한 확산에도 접합부까지 영향을 받지 않는다. 그 결과 누설전류 발생이 최소화되어, 태양전지의 출력특성을 향상시킬 수 있다.

2.2.3 전면 면적 증가

에미터는 p-n접합면에서 분리된 전자가 전극으로 이동하는 통로의 기능을 수행한다. 태양전지 표면에 있는 0.4 μm 이내의 얇은 에미터 층으로 전자가 이동하면서 저항손실이 발생하게 된다. 에미터 층의 저항 손실은 아래와 같다.

$$Emitter_P_{loss} = \frac{J^2 \rho_s S^3}{24} \quad (2)$$

ρ_s : emitter sheet resistivity

J : current density

d : finger length

S : finger spacing

선택적인 에미터를 형성하는 경우, 저농도로 도핑된 전극 이외 부분의 면저항(ρ_s)이 증가하여 저항손실이 커지게 된다. 따라서, 저항손실을 줄이기 위해서는 전극간의 간격(finger spacing, S)을 줄여야 한다. 그러나 특정 길이의 기관에서 전극의 간격을 줄이게 되면, 전극의 개수가 증가하므로 전극의 표면적(전극 개수 × 전극 폭)이 증가하게 된다. 수광부의 전극은 빛을 반사하여 반사 손실의 원인이 되는데, 전극의 표면적이 증가함에 따라, 전극에 의한 반사 손실도 비례하여 증가하게 된다. 즉, 전극의 반사손실과 에미터의 저항 손실과는 trade off 관계가 된다. 따라서, 전극간격과 에미터 도핑 조건을 최적화하여 손실을 최소화하여야 한다. 아래의 그림 5는 선택적인 에미터 구조(전극부 20 Ω/□, 수광부 100 Ω/□)를 형성한 태양전지에서 전극 간격과 전극 폭에 의한 반사손실과 저항손실을 합산한 종합손실(Total loss)을 나타낸다. 그림 5에서 보듯이 선택적 에미터 구조에서 전극 폭이 줄어들수록 반사손실이 감소하여 종합손실은 감소한다. 전극 폭이 120 μm인 경우 전극 간격은 2.1mm에서 전력 손실이 최소화되고, 전극 폭이 60 μm인 경우 전극 간격이 1.7mm에서 전력 손실이 최소화된다. 결론적으로 선택적 에미터 구조에 60 μm의 미세 선폭을 형성하였을 경우 120 μm 전극에 비해 전력손실을 약 3% 저감할 수 있다.

3. 결 론

결정질 실리콘 태양전지의 선택적 에미터를 최적화된 구조로 설계하기 위하여 태양전지 1차원 모델링 프로그램(PC1D)을 이용하여 에미터 도핑 정도에 따른 내부 양자효율 변화를 시뮬레이션 해 보았다. 그 결과 단파장의 재결합 손실을 줄이기 위하여 에미터 면저항 120 Ω/□으로 설계했을 경우 변환효율 17.4%로 면저항 60 Ω/□ 에미터보다 변환효율을 0.8% 향상시킬 수 있었다. 또한 선택적 에미터 구조에서 반사손실과 저항손실을 분석하여 태양전지의 최적화된 전극 간격과 전극 폭을 설계하였다. 그 결과 선택적 에미터 구조에 60 μm 미세 선폭을 형성시킬 경우 120 μm 선폭 대비 태양전지의 출력 손실을 약 3% 저감할 수 있다.

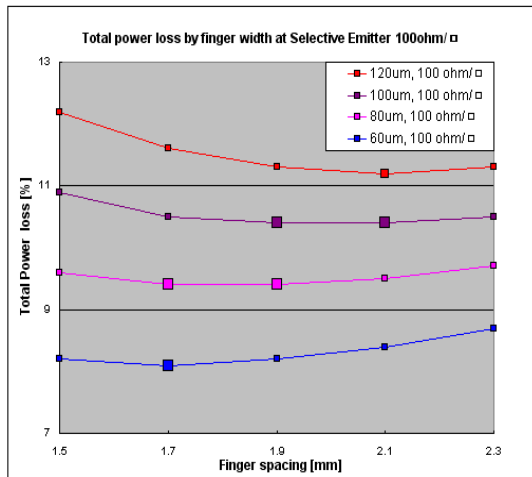


Fig. 5 전극간격과 전극폭의 변화 따른 종합 손실 (Total loss) 변화

References

- [1] Green, M.A. and Keevers, M. "Optical properties of intrinsic silicon at 300 K ", Progress in Photovoltaics, p.189-92, vol.3, no.3; (1995)
- [2] Green, M.A. "Applied photovoltaics", pp. 55-56, Centre for Photovoltaic Devices and Systems
- [3] S. Wenham, L. Mai, J. Ji and Z. Shi, "Low Area Metal Contacts for Screen-Printed Solar Cells", Provisional Patent Specification, May 2005
- [4] S. Wenham, L. Mai, B. Tjahjono, J. Ji and Z. Shi, "Innovative Emitter Design and Metal Contact for Screen-Printed Solar Cells", Conference, Shanghai, October 2005