

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 17, No. 1, 1997

고효율 단결정 실리콘 태양전지

김동섭, 조은철, 조영현, A. U. Ebong, 민요셉, 이수홍

삼성종합기술원 전자재료 Lab. 태양전지팀, 수원우체국 사서함 111, 440-600

High Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells

D.S.Kim, Y.H.Cho, E.C.Cho, A.U.Ebong, Y.S.Min and S.H.Lee

*Photovoltaics, Electronic Materials Lab, Materials Sector,
Samsung Advanced Institute of Technology, Suwon P. O. Box 111, 440-600, Korea*

요 약

단결정 실리콘 태양전지는 PESC(Passivated Emitter Solar Cell), PERC(Passivated Emitter and Rear Cell), Point Contact Cell, PERL(Passivated Emitter and Rear Locally-Diffused Cell) 형태로 기술적인 발전을 해왔다. BCSC(Buried Contact Solar Cell)는 낮은 제조 단가로 높은 효율을 얻을 목적으로 개발되었으며 개량된 형태인 DSBC (Double Sided Buried Contact Cell)는 양면으로 빛을 흡수할 수 있는 장점이 있다.

Abstract

Since PESC(passivated emitter solar cell) was developed in 1985, high efficiency silicon solar cell technology based on planar technology has been improved in the order of PERC, Point Contact Solar Cell, PERL. BCSC and DSBC, which do not require photolithography, are expected to replace commercial screen printed cells because of its potential for low cost and high efficiency. In this paper, history and characteristics of each type of cells are reviewed.

1. 서론

최근의 심각한 환경 오염 문제로 인해 청정 에너지의 중요성이 점점 더 증대되고 있다. 태양전지는 무공해, 자원의 무한정, 반 영구적 수명 등의 장점을 가지고 있으며, 환경 문제 뿐만 아니라 인류의 에너지 문제를 궁극적으로 해결할 수 있는 에너지원으로 기대되고 있다.

단결정 실리콘 태양전지는 1995년 전세계 태양전지 총 생산량의 약 57.4%를 차지하였으며[1] 효율이 다른 전지에 비해서 높고, 지속적으로 제조 단가를 낮추는 기술이 개발되고 있기 때문에 앞으로도 계속 그 시장이 성장할 것으로 예상된다. 단결정 실리콘 태양전지에 있어서는 웨이퍼 가격이 차지하는 비중이 크고 태양전지를 설치할 때 소요되는 interconnection, encapsulation, 모듈 설치, 설치에 필요한 땅 값 등 태양전지 이외의 비용이 전지의 총 면적에 비례하기 때문에 전지의 효율 증가는 전지 자체의 제조 단가(\$/Wp)를 낮추는 효과도 있지만 발전 단가를 낮추는 중요한 변수로도 작용한다.

단결정 실리콘 태양전지의 역사는 50년 이상 거슬러 올라가지만 전지의 효율이나 태양전지에 관한 이론은 최근 10년간 급격히 발전하였다[2]. 1985년 산화막을 이용한 passivation 기술을 에미터에 적용한 PESC(Passivated Emitter Solar Cell)는 그때까지 실리콘 태양전지의 한계효율이라 생각되었던 에너지 변환효율 20%를 돌파하였다[3]. Passivation 기술을 전지의 양면에 적용한 전지로 Point Contact Solar Cell[4, 5] 과 PERC(Passivated Emitter and Rear Cell)[6, 7] 가 개발되었으며 전자는 효율이 22%를 넘어선 최초의 태양전지이다. PERL(Passivated

Emitter and Rear Locally-Diffused Cell)[8]은 전면은 PESC와 유사하고 후면은 Point Contact Cell에서 사용한 전극 형태를 이용하여 개발되었으며 효율은 24%로 현재 세계 최고의 효율을 기록하고 있다.

지상용으로 태양전지를 실용화 하기 위해서는 효율도 높아야 하지만 제조 단가가 낮아야 한다. 이러한 관점에서 PESC보다 가격이 저렴하면서도 효율이 비슷한 BCSC (Buried Contact Solar Cell)[9, 10]는 기존의 결정질 실리콘 태양전지 시장의 대부분을 차지하고 있는 스크린 프린팅 태양전지를 대체할 것으로 생각된다.

BCSC 기술을 양면에 적용하여 BCSC가 가지는 후면의 약점을 보완하고 전지의 양면에서 빛을 흡수할 수 있는 구조인 DSBC(Double Sided Buried Contact Cell)[11]는 이론 효율이 BCSC보다 높고 제조 단가도 낮기 때문에 최근 주목을 받고 있다.

본 논문은 최근 10년간의 단결정 실리콘 태양전지의 발전과정을 간략하게 알아보고 각 태양전지의 특징에 대해서 기술하였다.

2. 고효율 실리콘 태양전지

2-1 Passivated Emitter Solar Cell (PESC)

실험실 수준의 실리콘 태양전지의 발전과정을 그림 1에 나타내었다. 실리콘 태양전지의 역사는 그림에서 볼 수 있듯이 1950년대 까지 거슬러 올라가지만 1970년대 중반의 Violet[12] 전지나 Black[13] 전지 이후 약 10년간 효율의 큰 변화가 없었다. 1980년대에는 마이크로อิเล็กทรอนิกส์에서 사용하기 시작한 실리콘 산화막을 이용한 실리콘 표면 passivation 기술과 전극의 passivation 기술을 적용하면서 고효율 태양전지 시대가 도래하였다. 이 기술

을 이용한 대표적인 전지로는 MINP (Metal-Insulator-NP junction)[14] 전지와 PESC[3, 15]가 있으며 PESC는 20%의 벽을 넘는 최초의 전지이다.

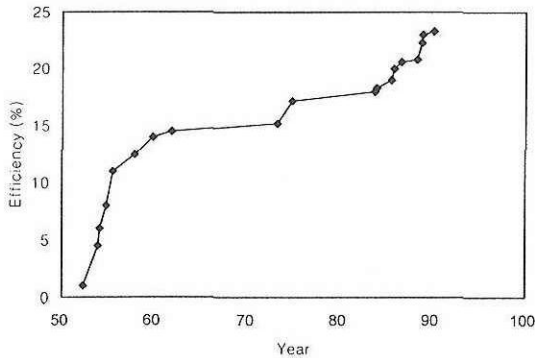


Figure 1. History of Silicon Laboratory Cell.

그림 2에는 PESC의 개략도를 나타내었다. 전면의 emitter를 산화막으로 passivation하고 전극이 형성될 부근의 산화막은 photolithography 공정으로 제거한다. 이때 전극을 passivation 하기 위해서 금속이 증착될 부분의 면적을 아주 좁게 한다. 알루미늄을 후면에 증착하고 900~1100℃에서 1~20 시간 열처리 하여 p⁺층을 가지는 후면전극을 형성한다. 표면 passivation은 청색 파장에서의 반응도 향상에 의한 단락전류밀도를 증가시키고 역포화 전류밀도 (Reverse Saturation Current Density)를 줄여서 개방전압을 증가시키는 역할을 한다. 열처리 공정은 알루미늄층과 실리콘과의 접촉저항을 낮추고, 공정 중에 후면에 생길 수 있는 n-type 영역을 제거하고, 후면에서 빛을 난반사 시켜 light trapping 효과를 주며, 실리콘 내부의 불순물을 게터링하는 역할을 한다.

결론적으로 PESC 특징은 산화막에 의한 표면 passivation, 좁은 전극면적에 의한 전극 passivation, 저농도의 에미터 확산, 알루미늄 함금에 의한 후면 passivation, 텍스처링과 2중 반사방지막을 이용한 표면 반사방지 등을 들 수 있다.

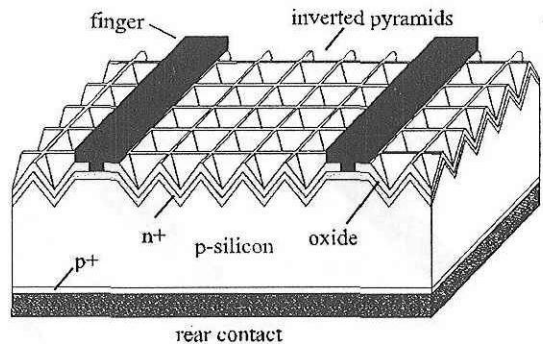


Figure 2. Passivated Emitter Solar Cell Structure

그러나 후면전극으로 사용된 알루미늄은 위에서 언급한 것과 같이 여러가지 장점이 있음에도 불구하고 열처리 중에 생기는 후면 결함에 의한 높은 재결합 속도 때문에 전지의 개방전압 (Open Circuit Voltage)을 670mV 이하로 제한하고 단락전류밀도 (Short Circuit Current)도 이론값 보다는 아주 낮게 하는 요인이 되었다.

2-2 Passivated Emitter and Rear Cell (PERC)

PESC 전지에서 후면 전극문제를 해결하기 위해서 알루미늄 대신에 보론을 후면에 확산시켜 보았지만 붕소 확산은 실리콘 표면에 손상을 주고 실리콘 내부의 life time을 줄여서 오히려 개방전압과 단락전류밀도를 낮추는 요

인이 되었다.

PESC의 후면 금속전극에서 생기는 문제점을 개선하기 위해서는 전지의 에미터 뿐만 아니라 후면도 passivation이 필요하게 되었다. 후면의 알루미늄을 실리콘 산화막으로 대체하고 극히 일부분의 산화막을 제거하여 금속 전극을 직접 실리콘에 형성하는 구조가 개발되었다. 그림 3에는 PERC 구조의 개략도를 나타내었다.

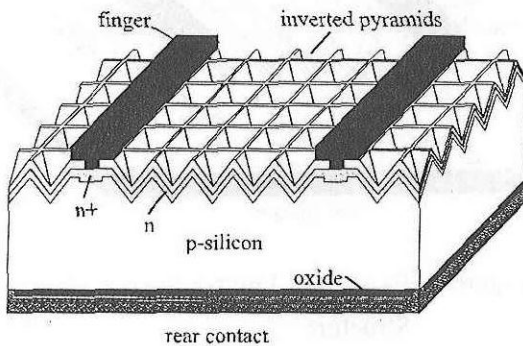


Figure 3. Passivated Emitter and Rear Cell Structure.

0.2 Ωcm , p-type 실리콘(도핑 농도 10^{17} cm^{-3}) 기판에서 알루미늄의 접촉저항은 약 $10^{-4}\text{ }\Omega\text{cm}$ 정도이고 one sun 하에서 0.1 Ωcm^2 정도의 접촉저항은 전지의 특성에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 후면 알루미늄의 전극면적이 0.1% 이상이면 전지의 직렬저항에 미치는 영향을 무시할 수 있다. 산화막의 성질을 개선하기 위해서 염소가 포함된 산화공정을 적용하였다. 산화막에 의한 표면 passivation은 개방전압을 700mV 이상으로 PESC에 비해서 크게 증가시켰다. 후면의 passivation은 전면 전극과 실리콘과의 접촉면에 인을 그 외의 에미터 영역에 비해서 고농도로 도핑

을 함으로써 약 10mV의 개방전압 증가를 가능하게 하였다. 열처리를 하지 않기 때문에 후면에서 실리콘과 합금을 형성하지 않은 알루미늄은 실리콘 산화막과 작용하여 후면에서 빛을 97% 이상 반사시킬 수 있는 반사막 역할을 하여 light trapping효과를 향상시켰다. 후면 실리콘 산화막 표면의 알루미늄에 의해서 표면의 재결합 속도를 증가시킬 수 있는 약간의 depletion이 실리콘 표면에 생기지만 실리콘 내부에서의 injection level이 증가하면서 이 문제는 줄어들게 된다. 전면에는 산화막의 두께를 250Å로 줄이고 MgF_2/ZnS 를 2중 반사방지막으로 사용하였다.

2-5 Point Contact Solar Cell

Stanford 대학의 R. M. Swanson 에 의해서 개발된 점접합 태양전지를 그림 4에 나타내었다[16, 17]. 두 종류의 전극이 모두 전지의 후면에 있기 때문에 금속 전극에 의한 shading loss가 없는 것이 특징이다. 전극을 후면에 형성하기 때문에 전극의 크기에 제약이 없어서 전극에 의한 저항손실을 작게 할 수 있는 장점이 있으며 concentrator cell에

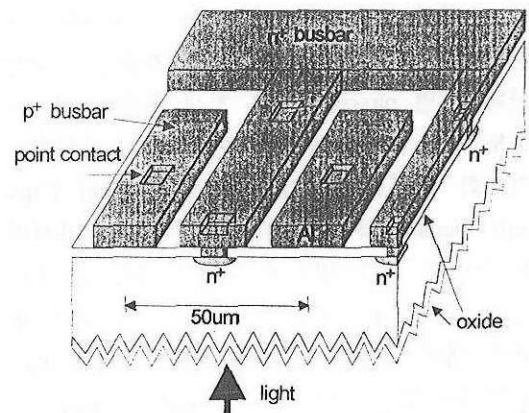


Figure 4. Rear Point Contact Cell.

적합하다. 면적이 0.15cm^2 이고 $40\sim 150\text{ sun}$ 에서 28% 이상, 1 sun에서는 22.3%의 효율을 얻었다[18]. 금속전극은 실리콘 산화막을 작은 점으로 없애고 도핑을 많이 하여 접촉저항과 재결합손실을 줄였다. 전면은 산화막으로 passivation을 하고 실리콘과의 계면에는 n-type으로 도핑을 하여 전면 인계전압을 인가해 주고 전지의 안정성을 증가시켜 주기도 한다. 전면에서의 Auger 재결합을 줄이고 전자와 홀이 후면에서 많이 수집될 수 있도록 웨이퍼의 두께는 $100\mu\text{m}$ 로 얇게 하고 비저항이 $100\Omega\text{cm}$ 이상으로 큰 것을 사용한다.

2-4 Passivated Emitter and Rear Locally-Diffused Cell (PERL)

PERC 구조는 후면 금속전극이 직접 실리콘에 접촉하기 때문에 전극에서의 재결합 속도가 크고, 접촉저항도 실리콘의 도핑 농도가 작은 경우에는 커지기 때문에 접촉저항을 낮추기 위해서 비저항이 낮은 웨이퍼를 사용해야 한다.

전극 부근의 실리콘을 붕소로 고농도 도핑을 하여 전극을 passivation하고 전극의 접촉

저항을 낮추는 PERL구조를 그림 5에 나타내었다. 이 구조에서는 개방전압 696mV , 단락전류밀도 42.9 mA/cm^2 , 충실도 81%, 효율 24.2%가 보고 되었다[19]. 독일의 프라운호퍼 연구소에서는 붕소 대신에 알루미늄으로 p^+ 층을 형성하는데 이용하여 21%의 전지 효율을 보고 하였다[20].

3. Buried Contact Solar Cell (BCSC)

최근 10년간 단결정 실리콘 태양전지는 PESC, PERC, PERL 순으로 발전해 왔다. 그러나 이들 전지는 사진식각 공정을 포함한 복잡한 공정으로 제조되기 때문에 지상용으로 실용화 하기는 어렵다. 전지의 가격을 기존 상업용 전지 수준으로 유지하면서 상업용 전지의 효율($12\sim 14\%$)과 실험실 수준의 효율($22\sim 24\%$) 차이를 극복한 전지가 BCSC다. 즉 전지의 효율을 PESC와 비슷하게 유지하면서 가격을 기존의 스크린 프린팅 태양전지와 비슷한 수준으로 낮추었다. 국내에서는 삼성중합기술원에서 BCSC 태양전지를 개발하여 1994년에 19%의 효율을 발표하였다.

3-1 제조 방법 및 특징

그림 6에는 BCSC 태양전지의 개략도를 나

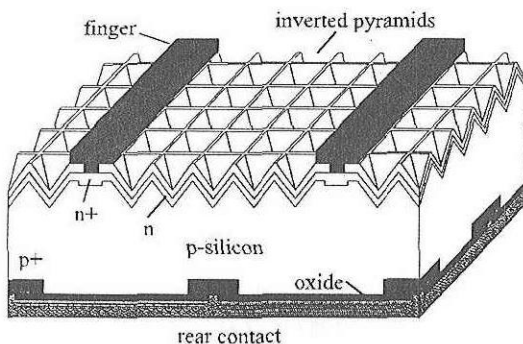


Figure 5. Passivated Emitter and Rear Locally Diffused Cell Structure

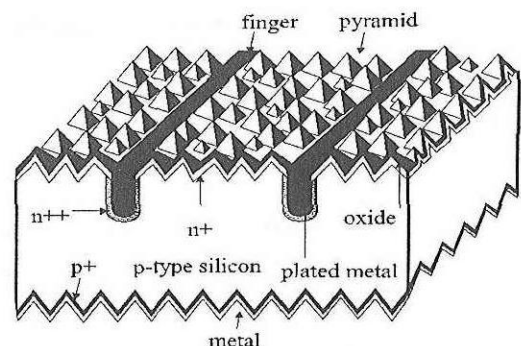


Figure 6. Buried Contact Silicon Solar Cell Structure.

타내었다. 레이저나 mechanical scribe를 이용하여 전면에 홈을 형성하여 전극이 홈 내부로 형성되어 있는 것이 구조적인 특징이다.

그림 7에는 BCSC 태양전지의 제조공정을 나타내었다. 웨이퍼의 표면을 KOH나 NaOH, IPA, 에탄올을 이용하여 이방성 에칭으로 약 $10\mu\text{m}$ 크기의 피라미드를 형성한다.

Fabrication Process of BCSC

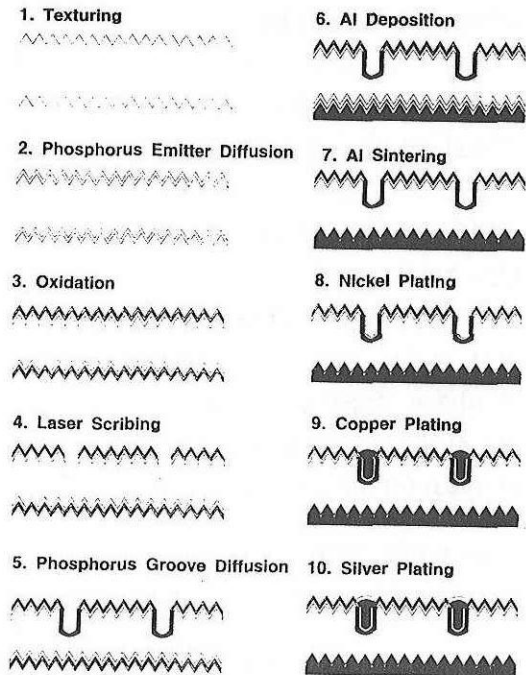


Figure 7. Process Scheme of Buried Contact Solar Cell.

에미터 형성은 태양전지가 완성된 다음에 판저항이 $100\sim 200\Omega/\square$ 가 되도록 조절한다. 다음에 산화막을 형성하게 되는데 이 산화막은 후속 공정 중이나 제조 후 여러 가지 역할을 한다. 공정 중에 불순물이 실리콘 내부로

침투하는 것을 막아주고 확산공정 중에는 확산 방지막 역할을 하며 도금중에는 도금 방지막 역할을 하고 또한 완성된 전지에서는 passivation과 반사방지막 역할을 한다. 산화막을 형성한 다음 폭 약 $20\mu\text{m}$, 깊이 $30\sim 50\mu\text{m}$ 의 홈을 형성하고 전극이 형성될 부분에 인을 고농도로 도핑 한다. 알루미늄을 진공증착기를 이용하여 후면에 증착하고 약 980°C 에서 $10\sim 20$ 시간 열처리를 한다. 이때의 알루미늄은 앞에서 언급한 PESC에서의 역할과 같다. 전면 전극은 무전해 전기도금 방법을 이용하여 Ni/Cu/Ag 순으로 형성한다. 값이 비싼 은, 타이타늄, 텅스텐등 대신에 구리를 전극물질로 사용하기 위해서는 실리콘 내부에서 소수 캐리어의 수명을 감소시키는 구리가 실리콘 내부로 확산되어 가지 않도록 해야 한다. 니켈을 무전해 방법으로 약 $1\mu\text{m}$ 두께로 도금하여 구리가 침투하는 것을 방지한다. 니켈/구리 금속을 이용한 태양전지의 수명은 20년 이상으로 보고 되고 있다[21].

3-2. Screen printing 태양전지와 BCSC의 비교

스크린 프린팅 태양전지는 전면 전극의 폭이 최소 $150\mu\text{m}$ 이고 높이는 $10\mu\text{m}$ 정도로 aspect ratio (전극 단면에서의 높이/넓이)가 작아서 전극에 의한 shading loss는 $10\sim 12\%$ 로 비교적 높다. 전면 전극을 형성하기 위해서 사용되는 은 paste는 가격이 비싸고 내부에 함유되어 있는 석영 성분 때문에 도포한 금속과 실리콘과의 접촉저항이 크고 열처리 한 후의 전극 물질 자체의 저항이 크다. 접촉저항에 의한 직렬 저항 때문에 에너지 손실이 약 20%까지 생긴다. BCSC 태양전지는 전극이 형성될 부위에 홈을 형성하여 홈 내부로 금속

을 채우기 때문에 aspect ratio가 3~5 정도로 커서 shading loss가 약 3%로 작고 무전해도금방법으로 제조되는 구리 전극은 가격이 저렴하고 전기 전도가 좋다는 장점이 있다. 인 확산을 2 단계로 할 수 있기 때문에 전극 부분은 고농도로 도핑을 하고 그 외의 영역은 저농도로 도핑을 하여 접촉저항을 줄이고 단파장 부근의 반응도를 증가시킬 수 있다. 산화막에 의한 표면 passivation과 낮은 농도의 에미터는 양자효율을 거의 100%까지 증가시킬 수 있다. BP solar는 100mm 사각형 실리콘 웨이퍼를 이용하여 18%의 효율을 얻었으며[22], 125cm²에서는 17% 이상을 보고하고 있다[23].

4. Double Sided Buried Contact Solar Cell (DSBC)

BCSC에서의 후면 금속전극은 표면 재결합속도를 증가시켜 개방전압을 낮추는 요인으로 작용한다. 또한 금속을 증착하기 위해서는 값

이 비싼 진공증착 장비를 사용해야 하는 단점을 가지고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 DSBC가 개발 되었으며 그 구조를 그림 7에 나타내었다. PERC이나 PERL 구조에서 후면의 산화막이 passivation 층으로 사용된 것과 같은 원리를 이용하여 후면에 산화막을 형성하고 후면 전극을 BCSC의 전면 전극과 같은 방법으로 형성하였다. 후면의 산화막에 의한 passivation은 표면 재결합속도를 줄여서 기존의 BCSC에 비해서 10% 정도의 효율 향상을 가져올 수 있으며[24] 비저항이 높거나 두께가 얇은 기판을 사용할 경우도 개방전압에 미치는 영향을 BCSC비해서 작게 할 수 있다.

산화막에 의한 passivation효과는 n-type 기판에서 더 크기 때문에[25] 후면에 인을 도핑하여 고립된 n-type층(Rear Floating Junction)을 형성함으로써 passivation 효과를 높일 수 있다. 또한 진공증착기를 사용하지 않기 때문에 BCSC에 비해서 제조 단가가 낮은 장점도 가지고 있다. Static concentrator를 사용하여 전지의 후면에도 빛을 입사시켜 전지의 양면을 사용할 경우 태양전지의 면적을 줄일 수 있는 장점도 있다[26].

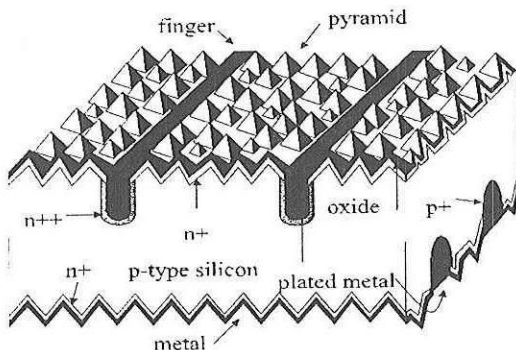


Figure 8. Double Sided Buried Contact Solar Cell Structure.

Table 1에는 1Ωcm 기판을 사용할 경우 전면과 후면의 재결합속도에 따른 전지 상수를 PC-1D을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 나타내었다.

표에서 알 수 있듯이 이론 효율이 23% 이상임을 알 수 있다. 같은 방법으로 BCSC에 시뮬레이션을 적용할 경우 약 21%의 효율을 얻을 수 있다. 이때 기판 두께는 280μm, 에미터 농도는 3X10¹⁸, 에미터 깊이는 1.088μm를 각각 적용하였다.

Table 1. The result of the PC-1D modeling for 1 Ω cm substrate as a function of front and rear surface recombination velocity.

Voc(mV)	Jsc(mA/cm ²)	η (%)	FF(%)	Sn, Sh (cm/sec)
705.7	40.2	23.6	83.2	10
704.4	40.2	23.6	83.3	50
703.0	40.2	23.6	83.5	100
700.0	40.2	23.5	83.5	200
695.2	40.1	23.3	83.6	600
691.3	40.1	23.2	83.6	800
689.5	40.1	23.1	83.6	1000

5. 결 론

단결정 실리콘 태양전지는 1985년 PESC 태양전지가 개발되면서 고효율 시대가 시작되었으며 최근 10년간 약 5%의 효율이 증가되었다. 효율을 증가시키기 위해서 여러 복잡한 공정이 추가로 적용되면서 제조단가도 따라서 증가되었다. 효율 증가는 실리콘 표면의 passivation, 광반사 손실을 줄이기 위한 광 trapping 기술, 저항 손실을 줄일 수 있는 전극 형성 기술의 발전이 중요한 역할을 하였다. BCSC는 고효율 태양전지에 많이 사용되는 사진식각 공정을 사용하지 않고 고효율을 얻을 수 있는 구조로 앞으로 스크린 프린팅 태양전지를 대체할 것으로 기대되고 있다. DSBC는 양면을 산화막으로 passivation하고 전면과 후면에 함몰형 전극을 형성하기 때문에 BCSC에서의 후면 알루미늄 전극의 문제점을 제거할 수 있다. DSBC에서는 후면 전극에서의 shunt path 방지, 홈내의 불소 확산,

무전해 도금에 의한 전극형성 등이 중요한 기술이며 제조 공정이 단순하고 제조 단가가 낮아서 실용화가 아주 유망한 차세대 태양전지로서 많은 기대가 되고 있다. 단결정 실리콘 태양전지는 태양전지의 이론 및 새로운 기술을 응용하고 개발하는데도 중요한 역할을 해왔다. 1995년도 세계 태양전지 시장의 57.4%를 차지한 단결정 실리콘 태양전지는 앞으로 태양전지 자동차, 인공위성, 휴대용 전자 기기 등 고효율이 요구되는 분야에서 수요가 계속 증가할 것으로 예상된다.

6. 참고문헌

1. Photovoltaic News, Vol. 14, February 1995, p4.
2. M. A. Green, Semicond. Sci. Technol. , Vol. 8, 1993, p1.
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. R. M. Swanson, S. K. Beckwith, R. A. Crane, W. D. Eades, Y. H. Kwark, R. A. Sinton and S. E. Swirhun, IEEE Transactions on Electron Devices, vol ED-31, No. 5, 1984, p661.
5. R. A. Sinton, Y. H. Kwark, P. Gruenbaum and R. M. Swanson, 1985, p61.
6. M. A. Green, A. W. Blakers, J. Zhao, A. M. Milne, A. Wang and X. Dai, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol 37, No. 2, 1990, p331.
7. A. W. Blakers, A. Wang, A. M. Milne, J. Zhao, and M. A. Green, Appl. Phys. Lett. , Vol. 55, No. 13, 1989, p1363.
8. J. Zhao, A. Wang, P. P. Altermatt, S. R. Wenham and M. A. Green, First WCPEC, Hawaii, 1994, p1477.
9. C. M. Chong, S. R. Wenham, and M. A. Green, Appl. Phys. Lett. Vol. 52, No5, 1988, p407.
10. S. R. Wenham, Progress in Photovoltaics : Research and Applications. Vol1, 1993, p3.
11. A. U. Ebong, S. H. Lee, C. Honsberg and S. R. Wenham, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35, No. 4A, 1996, p2077.
12. Lindmayer J and Allison J, COMSAT Tech. Rev. 3,1973.
13. Haynos J, Allison J, Arndt R and Meulenbergen A, Int. Conf. on Photovoltaic power Generation, 1974, p487.
14. M. A. Green, A. W. Blakers, J. Shi, E. M. Keller and S. R. Wenham, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-31, No. 5 1984, p679.
15. A. W. Blaker, and M. A. Green, Appl. Phys. Lett. Vol. 48, 1986, p215.
16. R. M. Swanson, S. K. Beckwith, R. A. Crane, W. D. Eades, Y. K. Kwark, R. A. Sinton and S. E. Swirhun, IEEE Trans. Electr. Dev. Vol. 31,1984, p661.
17. R. A. Sinton, Y. Kwark, J. Y. Gan and R. M. Swanson, Elec. Dev. Lett. Vol. 7, 1986, p567.
18. R. A. Sinton, P. Verlinden, D. e. Kane and R. M. Swanson, Proc. 8th Photovoltaic Solar Energy Conf. , Florence, 1988, p. 1472.
19. J. Zhao, A. Wang and M. A. Green, Prog. in Photovoltaics, Vol. 2, 1994, p227.
20. J. Kopp, J. Knobloch, and W. Wettling, 11th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, 1992, p49.
21. M. G. Cole, R. A. Pryor and T. G. Sparks, 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1981, p522.
22. N. B. Mason and D. Jordan, 10th E. C. Photovoltaic Soar Energy Conferenc, 1991, p280.
23. T. M. Bruton, K. C. Heasman, J. P. Nagle, D. W. Cunningham, N. B. Mason, R. Russell and M. A. Balbuena, 12th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, 1994, p761.
24. A. U. Ebong, M. Taouk and S. R.

- Wenham, Solar Energy Materials and Solar Cells, 1994, p499.
25. A. G. Aberle, Glunz Stefan and Warta Wilhelm, J. Appl. Phys. , Vol. 171, No. 9, 1992, p4422.
26. S. Bowden, S. R. Wenham and M. A. Green, 12th E. C. Photovoltaic Solar Energy Conference, 1994, p1893.