

에미터 랩쓰루 실리콘 태양전지 개발

조재억* · 양병기 · 이홍구 · 현덕환 · 정우원 · 이대종 · 홍근기 · 이성은 · 홍정의
한화케미칼 중앙연구소 솔라연구센터, 대전광역시, 305-804

Current Status of Emitter Wrap-Through c-Si Solar Cell Development

Jaeock Cho* · Byungki Yang · Honggu Lee · Deochwan Hyun · Woowon Jung · Daejong Lee · Keunkee Hong · Seong-Eun Lee · Jeongeui Hong

Solar R&D Center, Hanwha Chemical Research & Development Center, Daejeon 305-804, Korea

ABSTRACT: In contrast to conventional crystalline cells, back-contact solar cells feature high efficiencies, simpler module assembly, and better aesthetics. The highest commercialized cell and module efficiency was recorded by n-type back-contact solar cells. However, the mainstream PV industry uses a p-type substrate instead of n-type due to the high costs and complexity of the manufacturing processes in the case of the latter. P-type back-contact solar cells such as metal wrap-through and emitter wrap-through, which are inexpensive and compatible with the current PV industry, have consequently been developed. In this paper the characteristics of EWT (emitter wrap-through) solar cells and their status and prospects for development are discussed.

Key words: EWT, emitter wrap-through, back contact, IBC, MWT, RISE-EWT, selective emitter, back surface passivation, laser hole drilling

Nomenclature

S_{front} : surface recombination velocity

t_{bulk} : bulk lifetime

V_{oc} : open-circuit voltage

J_{sc} : short-circuit current

FF : fill factor

Subscript

EWT : emitter wrap-through

BCSC : back contact solar cell

IBC : interdigitated back contact

MWT : metal wrap-through

VIRE : via-resistance induced recombination enhancement

RISE-EWT : rear interdigitated single evaporation emitter wrap-through

1. 서론

현재 태양전지의 다수를 점유하고 있는 기존 결정질 실리콘 태양전지는 turn-key line 장비도입이 가능해지면서 생산 설비의 급증으로 PV 시장의 85% 이상을 점유하고 있다. 그러나 화석연료와의 경쟁에서 우위를 점유하기 위해서는 지속적인 원가 절감 및 고효율 기술개발이 요구되고 있다. 결정질 실리콘 태양전지의 고효율 디바이스로 가장 주목받는 것이 후면전극(back contact solar cell) 태양전지이다. 태양전지의 전면 및 후면에 전극을 가지는 양면전극 태양전지는 수광면에 위치하는 전극의 빛 가림에 의한 shading loss로 전류의 손실을 피할 수 없다. 이를 극복하기 위한 태양전지가 (+)/(-) 전극이 모두 후면에 위치하는 후면전극 태양전지이다.

후면전극은 광흡수 증대에 의한 전류증가 이외에도 외관이 미적으로 우수하고 기존 셀의 모듈화 공정에 필요한 태버(tabber)나 스트링거(stringer) 같은 장비가 필요치 않아 모듈화

*Corresponding author: jecho@hanwha.co.kr
Received March 25, 2013; Revised April 10, 2013;
Accepted April 18, 2013

가 용이하다. 회로가 인쇄된 전도성 백시트를 사용하는 경우 Pick-and-place 공정에 의해 자동화가 쉽기 때문에 약 10-20%의 모듈 코스트를 절감할 수 있다고 알려져 있다¹⁾. 또한 저항 손실이 낮고 태양전지 간의 간격을 줄일 수 있기 때문에 모듈 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 연결 리본이 꺾이지 않기 때문에 모듈의 열 안정성도 뛰어나다. 원가 절감을 위해 결정질 실리콘 태양전지의 기판 두께는 지속적으로 감소하여 2020년에는 약 120 μm까지 감소할 것으로 예측되고 있다²⁾. 따라서 기판의 초박형화가 진행되면 현재의 양면전극 형태의 기존 태양전지는 새로운 모듈 기술이 등장하지 않으면 파손률 증가로 모듈화가 쉽지 않을 것으로 예측되고 있다. 따라서 후면전극 태양전지는 고효율 및 원가절감 측면에서 가장 이상적인 디바이스로 평가되고 있다.

후면전극 태양전지는 (+)/(-) 두 전극이 후면에 위치하고 있다는 공통점에도 불구하고 사용되는 기판, 셀 구조, 전극형성 공정, 고효율 한계 및 기존의 상업화 라인에 적용 가능성 등이 매우 다르다. 상업화된 후면전극 태양전지로는 Sunpower사의 IBC (interdigitated back contact) 태양전지와 ECN에서 개발한 MWT (metal wrap-through) 등이 있고 MWT 태양전지 보다 고효율 가능성이 있는 EWT 태양전지 등이 개발 중에 있다.

본 논문에서는 현재 개발이 진행되고 있는 EWT 태양전지의 특징 및 개발 현황 등을 살펴보고 향후 EWT의 고효율 전략 등에 대해 살펴보고자 한다.

2. 후면전극 태양전지

2.1 후면전극 분류

후면전극은 전류를 추출하는 (+)/(-) 두 전극이 태양전지의 후면에 위치하는 태양전지를 지칭하는 용어이지만 캐리어를 분리하는 pn-정선의 위치에 따라 Table 1과 같이 다시 세분화할 수 있다. p-type의 기존 태양전지는 정선이 태양전지의 전면에 위치하는 전면정선/양면전극 (front-junction double-sided contact) 태양전지이다. 반면 Sunpower사의 IBC 후면전극 태양전지는 정선이 태양전지의 후면에 위치하는 후면정선/후면전극 (back-

junction back contact) 태양전지이다.

2.2 기판

정선이 기판의 후면에 위치하는 경우 전면에서 발생된 캐리어가 재결합되지 않고 후면까지 도달하기 위해서는 표면재결합속도(S_{front})가 낮고 기판의 bulk lifetime(t_{bulk})이 커야 한다. 두 가지 중의 어느 하나라도 낮으면 고효율 달성이 어렵다. 시뮬레이션 결과에 의하면 후면정선/후면전극 태양전지의 고효율을 위해서 소수 캐리어의 벌크확산 거리는 기판두께의 4배는 되어야 하는 것으로 나타난다³⁾. 따라서 후면정선/후면전극 태양전지인 IBC 태양전지는 고품위 n-type 기판 및 oxide passivation 등 고효율 기술을 적용하여 제작되고 있다.

현재 상업화된 태양전지는 대부분 p-type의 기판을 사용하고 있기 때문에 p-type 기판을 사용하여 후면정선/후면전극 태양전지를 제작하는 경우 확산거리가 짧기 때문에 고효율 달성이 어렵다. 태양전지의 광흡수에 의해 발생하는 캐리어는 표면 20μm 이내에서 80%가 생성되는 것으로 알려져 있기 때문에 p-type 기판의 경우 캐리어의 분리 수집 확률을 높이기 위해서 pn-정선은 가급적 태양전지의 전면에 위치하는 것이 유리하다.

2.3 p-type 후면전극 태양전지

n-type 후면정선과 달리 p-type 전면정선을 이용하여 후면전극을 구현하기 위해서는 전면에서 수집된 캐리어를 후면으로 보내기 위한 전극구조의 변경이 필요하다. 이를 구현하기 위한 방법으로 레이저를 이용하여 비아홀(via-hole)을 형성하고 이 홀을 통하여 전면과 후면의 전극을 연결하는 기술을 사용하게 된다. 따라서 비아홀 형성이라는 기존 태양전지 및 후면정선/후면전극에는 존재하지 않는 입체적인 셀 구조화 공정이 추가되는 것이 가장 큰 특징이며 레이저의 홀 드릴링(laser hole drilling) 공정이 매우 중요한 비중을 차지하고 있다.

2.3.1 MWT 태양전지

ECN의 PUM(pin-up-module) 개념에서 출발한 MWT 태양전지는 수십에서 수백 개의 비아홀을 중심으로 핑거전극(finger electrode)이 방사형으로 배치된 구조를 갖는다. 그 구조는 아래 Fig. 1과 같다. 기존 태양전지의 전극과 같은 버스바(busbar)가

Table 1. 정선 종류에 따른 후면전극 분류

| PN 정선 | 전극연결 | 디바이스 | Structure |
|-------|-----------------|------|-----------|
| 전면 | 양면 (스크린 프린팅) | 표준형 | |
| | 후면 (스크린 프린팅) | MWT | |
| 양면 | 후면 (스크린 프린팅) | EWT | |
| 후면 | 후면 (도금) | IBC | |

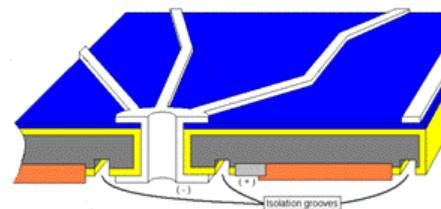


Fig. 1. MWT 태양전지

존재하지 않고 비아홀 내부에 채워진 전극이 버스바를 대신하기 때문에 버스바에 의한 빛가림 손실이 적어 전류가 2% 정도 증가하고 태양전지 효율로는 기존 태양전지 대비 0.3% 정도 증가한다. 모듈공정에서 MMA(monolithic module assembly) 공정을 적용하면 넓은 면적의 전도성 백시트에 의한 직렬저항 감소에 의해 CTM (cell to module) 손실이 적기 때문에 일반모듈 대비 0.5% 더 높은 효율을 기대할 수 있다. 제조공정은 기존 태양전지에 비하여는 복잡하지만 후면전극 종류 중에서는 가장 간단한 구조를 갖는다. 비아홀 드릴링 공정을 제외하면 표준 태양전지 제조공정과 크게 다르지 않기 때문에 기존 상업화 라인을 활용할 수 있는 장점이 있다⁴⁾. 현재 6 인치 p-type에서 MWT 태양전지의 최고 효율은 Canadian Solar에서 발표한 21.11%이다⁵⁾.

2.3.2 EWT 태양전지

1993년 James M. Gee 등⁶⁾에 의해 처음 발표된 EWT 태양전지는 전면 핑거전극을 가지는 MWT 태양전지가 가지는 빛가림 한계를 극복하기 위해 제안되었다. 그 구조는 Fig. 2와 같은데, p-type의 기판을 사용하는 기존 태양전지 생산 라인에 레이저 공정만 추가하여 고효율의 후면전극을 제작할 수 있다는 점이 장점이다. 전면 핑거전극이 없기 때문에 캐리어의 이동거리를 짧게 하기 위해 기판의 표면에 다수의 미세 비아홀을 형성하고 도핑층을 형성하여 도핑된 비아홀을 따라 전면 캐리어가 후면으로 이동하는 구조이다. UNSW에서 개발한 세미컨덕터 핑거와 같은 컨셉이라고 할 수 있다⁷⁾. 도핑된 비아홀이 전도체 역할을 하기 때문에 6인치 기판에 15,000개 전 후의 비아홀을 형성한다. 횡저항 손실을 줄이기 위하여 일반 태양전지보다는 낮은 비저항이 유리하다⁸⁾. 현재 보고된 EWT 태양전지의 최고 효율은 92cm² 기판면적에서 ISFH가 보고한 21.4%이며 시뮬레이션 결과 22%까지 가능할 것으로 예측하고 있다. 현재까지 Lab. 개발 단계에서 고효율 가능성을 보여주고 있으나 상업화되기까지는 해결해야 할 문제들이 많이 남아있다.

EWT 태양전지의 구조, 특징 및 제조공정 등은 다음 장에서 자세히 논의될 것이다.

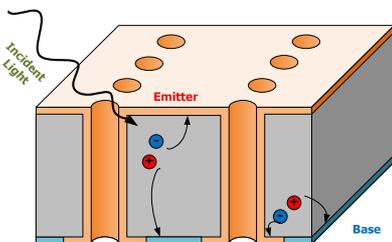


Fig. 2. EWT 태양전지

3. EWT 태양전지 특징 및 제조공정

3.1 정선

Fig. 2에서 알 수 있듯이 EWT 태양전지가 다른 결정질 실리콘 태양전지와 차별화되는 가장 큰 특징은 전면 emitter와 후면 emitter가 비아홀을 통해 연결되는 더블정선 셀이라는 점이다. 시뮬레이션 결과 전면의 전류밀도에 비해 후면의 전류밀도는 매우 낮기 때문에 후면 개방전압(Voc)이 낮고 두 정선이 공통 배이스를 가지면서 연결되므로 단일 정선을 가지는 일반 셀에 비해 EWT 태양전지는 개방전압이 약간 낮다.

전압 손실에도 불구하고 전면에 전극이 없고 후면 emitter에 의한 약간의 전류 기여 등으로 전류밀도가 매우 높기 때문에 전체적인 효율은 증가하는 것으로 시뮬레이션 결과는 보고되고 있다(EWT 태양전지 등가회로 Fig. 3 참조)⁹⁾.

3.2 기판

3.2.1 Bulk lifetime

실리콘 태양전지 개발 초기에는 기판의 품질이 낮아 후면정선으로 제작한 후면전극 태양전지의 효율이 높지 않았다. 따라서 캐리어를 전면 및 후면에서 추출하는 양면정선 후면전극 태양전지의 개념이 제안되었다.

Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 기판의 벌크확산거리가 작

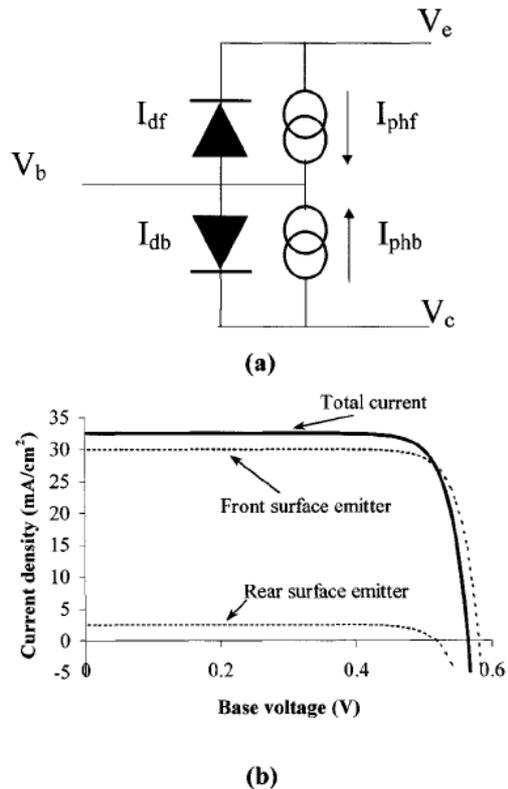


Fig. 3. EWT 태양전지의 단순화된 등가회로(a) 및 IV 특성(b)

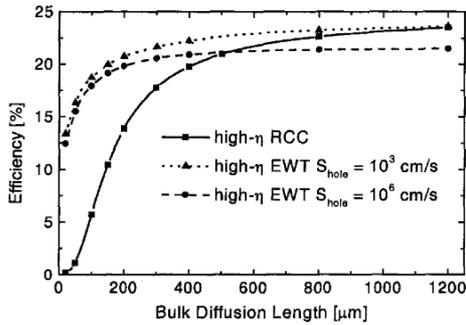


Fig. 4. 벌크 확산거리 크기에 따른 후면정선 셀과 EWT 셀의 효율 비교

은 기판에서는 후면정선보다 EWT 같은 양면정선 태양전지로 제작하는 것이 훨씬 고효율 달성에 유리하다. IBC 셀과 같은 후면정선 후면전극(rear contact cell) 셀들은 기판의 벌크 확산거리가 일정수준 이상의 고품위 기판에서만 고효율이 가능하다. EWT는 다결정 같은 저품위 기판에서도 후면전극 태양전지의 구현이 가능하다는 장점이 있다¹⁰⁾.

3.2.2 웨이퍼 비저항

EWT 태양전지가 약간 낮은 Voc에도 불구하고 높은 Jsc로 인해 높은 효율을 기대하였으나 기대만큼의 높은 효율달성이 쉽지 않은 이유는 낮은 FF 때문이다. 이를 해결하기 위해 비아홀을 헤비도핑(heavy doping) 하거나 비아홀 내부를 metal paste로 채우는 등의 시도가 이루어져왔으나 FF를 78% 이상으로 크게 높이지는 못하였다¹¹⁻¹⁴⁾. 현재 기존 셀의 FF가 79% 전후임을 감안하면 고효율에 진입할수록 EWT 셀의 FF 개선은 더욱 중요한 문제로 부각되었다. 이를 해결하기 위한 다양한 연구가 시도되었으며 현재 가장 두드러진 연구결과는 ISFH에서 발표한 VIRE (via-resistance induced recombination enhancement) 효과로 비아홀에서 발생하는 FF 저하는 비아홀 시리즈 저항보다는 재결합에 의한 효과가 크다. 따라서 비아홀 내부의 헤비도핑이나 metal paste 채움에 의한 시리즈 저항 감소효과는 크지 않다는 것이다. 그러므로 기판의 비저항을 낮춰 캐리어의 이동이 벌크를 통해 이동하게 하면 FF 감소를 줄일 수 있다는 것이다. 비저항이 각각 0.5Ωcm 과 5.0Ωcm 기판을 사용하여 EWT 셀을 제작한 결과 0.5Ωcm 기판에서 79%의 FF를 보고한 바 있다¹⁵⁾.

낮은 비저항의 기판을 사용하는 경우 B-O complex(boron-oxygen complex) 형성에 의한 광열화 증가 가능성 및 여러 셀 제작 공정상의 변화가 수반되어야 하기 때문에 실제 적용까지는 많은 변수들을 해결해야 한다.

3.2.3 웨이퍼 두께

실리콘 가격이 매우 높았던 초기 EWT 연구자들에게 박형화된 EWT 셀이 기존 셀에 비해 고효율, 저가격 및 후면전극이 가

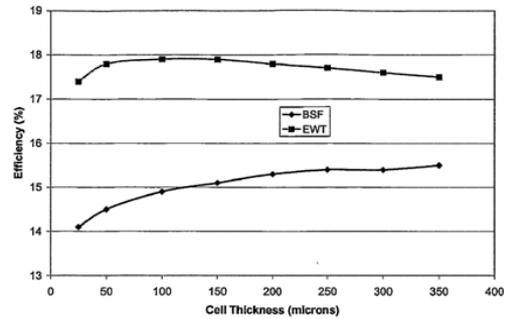


Fig. 5. 기판 두께에 따른 셀의 효율 비교

능하다는 점이 상당히 매력적이었던 것 같다. James M Gee 등이 출원한 특허에 기판 두께에 따른 효율 비교가 Fig. 5에 나와 있다. 1.2Ωcm 비저항에 확산거리가 288μm 인 기판에서 EWT 셀은 기판 두께가 100μm까지 감소하여도 효율이 계속 증가하는 것을 보여주고 있다¹⁶⁾.

EWT 태양전지의 박형화는 두 가지 관점에서 장점을 갖는다. 셀 제작 시 레이저에 의한 비아홀 드릴링 시간이 감소되기 때문에 레이저 장비 비용의 감소 및 제작 시간이 줄어들고 열에 의한 손상을 줄일 수 있다. 또한 캐리어의 이동경로가 단축되기 때문에 시리즈 저항도 감소하여 효율 증가도 기대할 수 있다.

3.3 레이저에 의한 미세 관통 홀 기술

3.3.1 레이저 기술

전면 정선을 후면 정선과 연결하기 위해서 비아홀의 개념이 도입되었으나 레이저 기술이 적용되기까지 커다란 진전을 이루지는 못하였다.

EWT 태양전지 제조를 위한 미세 관통홀(조사면 기준으로 직경 30~80μm)의 구현을 위해 레이저를 이용하는 것이 일반적인 기술이라는 사실은 이미 여러 논문에서 언급된 바 있으며, Schoonderbeek는 EWT 셀 제조의 핵심기술로써 레이저 비아홀 가공이 꼽히는 이유를 “레이저만큼 경제적이고 실현 가능한 대체 기술이 없기 때문이다”라고 하였다¹⁷⁾. Alexander Polyakov 등은 250 μm 두께의 웨이퍼에 직경이 50 ~ 100 μm인 비아홀 가공하기 위해서 파우더 블라스팅, 레이저 물질 제거, 레이저 용융 가공 및 Deep Reactive Ion Etching (DRIE) 기술을 비교한 결과 DRIE 와 레이저 공정 시 직경 100 μm 이하의 비아홀 가공이 가능했으며, 레이저 용융 가공의 경우 공정 후 기계적 강도가 약간 떨어지지만 열적 손상 제거를 위해 에칭을 통해 우수한 기계적 강도를 얻을 수 있음을 확인하였다¹⁸⁾. EWT 셀 제조 공정을 위한 레이저의 이용에서 가장 결정적인 요소는 비아홀의 가공 품질이다. 실제로 가공 완료 후 품질이 다른 모든 고려 사항들에 우선하게 되는데, 비아홀 가공 품질은 비아홀 측면의 품질, 비아홀 측면에서부터 웨이퍼 내로 퍼져나가는 미세 균열, 생성되는 가공 잔존물 및 레이저 가공 전/후 웨이퍼의 기계적인 강도 등을

모두 포함한다. 따라서 넓은 공정 대역 내에서 고품질을 얻는 것이 후속 에칭 과정을 통해 레이저에 의한 손상을 완화시키는 것보다 오히려 더욱 이상적인 해법이라는 주장도 있다. 하지만, 이를 위해서는 파장이 짧고 펄스 폭이 작은 레이저의 사용이 필수적인데, 이 경우 양산성과 제조원가 측면에서 볼 때 적용이 쉽지 않다. 또한, 기술적으로 Kling은 1 μm 파장의 펄스 또는 Q-스위치 Nd: YAG 레이저가 비교적 큰 광학적 침투 깊이를 가짐에도 불구하고, 초점에서 얻어지는 높은 출력 밀도로 인해 실리콘 표면이 가열되어 급격하게 용융될 수 있으며, 이로 인한 비선형적 흡수 효과로 인해서 결국 광학적 침투 깊이가 대폭 감소됨을 확인하였다¹⁹⁾. 최근에는 파장이 1 μm 정도이고, 출력이 40~100W 인 고품질의 다이오드 펌핑 고체레이저(DPSSL)들이 많이 출시되었을 뿐 아니라, 동시에 정해진 반복 주파수에서 펄스 폭을 가변(250 ns~2100 ns) 할 수 있어서 레이저를 이용한 비아홀 형성 공정 개발이 훨씬 용이해졌다²⁰⁾.

3.3.2 레이저 홀 형성 및 결합제거

Knorz 등에 따르면 펄스폭이 길수록 비아홀 가공에 필요한 레이저 펄스 수가 감소하며, 비아홀 가공 공정의 안정성이 증가할 뿐만 아니라 공정 효율도 높다고 한다. 그 이유는 첫째로 기화 실리콘의 반발 압력으로 인한 용융 실리콘 액체의 배출 때문이며, 두 번째는 생성된 분화구 벽에서 레이저 빔이 반사되면서 조사된 가우스 분포의 빔 단면 형상을 수정하여 분화구의 중심으로 집속이 용이하도록 유도되기 때문이라고 한다²¹⁾.

레이저 가공에 의한 미세 균열 등 열적 손상 및 잔존물을 제거하기 위해 에칭 공정이 필수적이며 보통은 KOH(Potassium hydroxide) 용액을 이용한다(Fig. 6 참조). 이때 단순한 손상 제거 외에 단면 피라미드 구조화가 동시에 진행될 수도 있다.

에칭 시간은 KOH 용액의 농도에 의존하지만, 에칭이 길수록 표면 재결합 속도가 감소하는 일반적인 경향을 보인다. 에칭 시간이 부족할 경우에는 비아홀 인접 영역에서 캐리어의 수명시간 감소 및 기계적 스트레스가 여전히 관측되며, 반면 지나친 에칭의 경우에는 레이저 빔에 의한 손상이 완전히 제거되지만 동시에 비아홀 가공에 의한 표면적 증가로 인해 캐리어의 수명시간이 미 가공된 웨이퍼에 비해 더 짧아지는 결과를 초래하게 된다. 비아홀에서 캐리어의 수명시간은 동일한 에칭 시간 조건에서 펄스폭이 길수록 실리콘 내부의 온도 분포의 기울기가 더

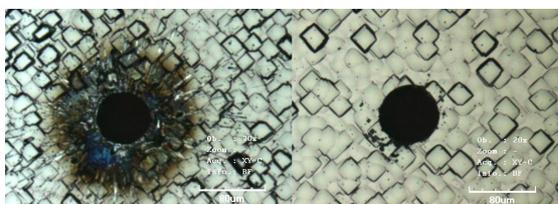


Fig. 6. 손상 제거 에칭 전/후 이미지

작아짐에 따라 열적 스트레스가 더 적기 때문에, 그리고 비아홀 밀도가 작을수록 재결합의 주요 원천인 pn 접합부가 작기 때문에 더 길어진다.

Mingirulli 등은 에칭 시간이 충분하지 않은 경우에 비아홀에 대한 passivation이 매우 중요하며, passivation은 p형 기판에서 SiO₂가 SiN_x보다 더 효과적이며, SiN_x의 passivation 효과는 비아홀의 반경이 증가할수록 더욱 커진다는 사실을 확인하였다²²⁾.

3.3.3 비아홀 밀도 및 패턴링

EWT 태양전지에서 비아홀의 크기, 홀밀도 및 홀패턴 등은 직렬저항에 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다.

비아홀의 직경이 증가하면 홀 내부 표면적이 증가하고 캐리어의 이동경로가 증가하여 직렬저항이 감소한다. Fig. 7의 시뮬레이션 결과를 보면 비아홀의 직경이 증가함에 따라 직렬저항이 감소하는 것을 잘 보여주고 있다¹⁴⁾.

직렬저항에 미치는 영향은 홀의 직경보다 홀의 개수가 더 중요하다. 기판의 비저항 및 emitter의 면저항에 따라 시뮬레이션하여 적절한 홀 개수를 결정할 수 있으며 일반적으로 1~2 mm² 당 1개의 홀밀도가 가장 많이 적용된다. 6인치 단결정 기준으로 12,000~24,000개의 홀을 갖게 된다.

홀의 개수가 정해지면 홀의 패턴을 결정해야 한다. 홀 라인에는 emitter 전극이 그리고 emitter 전극 사이에는 base 전극이 인쇄되기 때문에 캐리어의 이동거리를 고려하여 저항손실이 최소

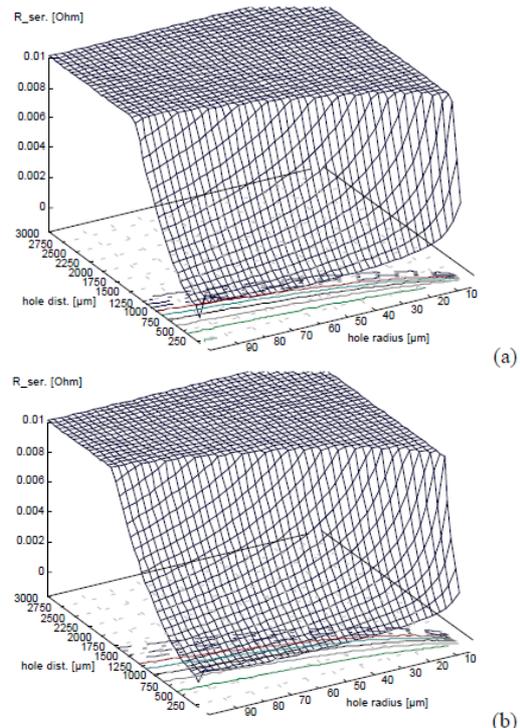


Fig. 7. 비아홀의 직경에 따른 직렬저항 변화 시뮬레이션 a) 홀에 전극 안채워짐 b) 홀에 전극 50% 채워짐

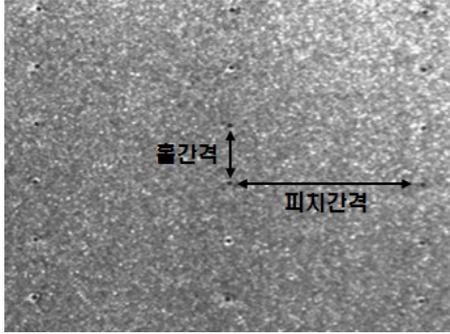


Fig. 8. 비아홀 패턴의 홀간격 및 피치간격

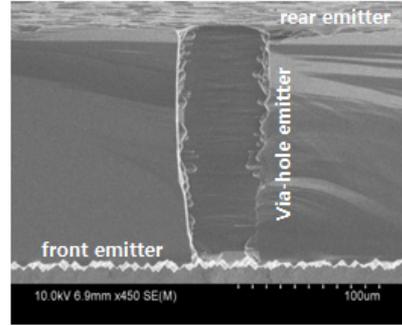


Fig. 10. EWT 태양전지의 emitter 구조

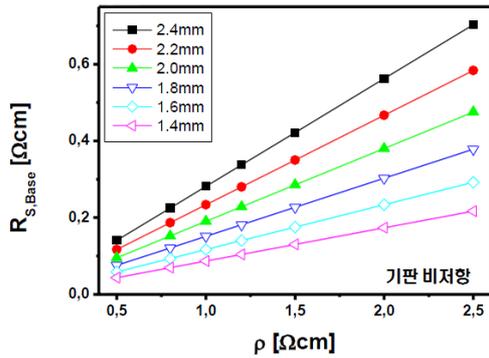


Fig. 9. 기판의 비저항 및 피치간격 변화에 따른 직렬저항 변화

화되게 홀간격 및 피치간격을 디자인하여야 한다.

피치간격(Fig. 8 참조)이 넓어지면 캐리어의 횡방향 이동거리가 늘어나기 때문에 직렬저항이 증가한다. Fig. 9는 EWT에서 기판의 비저항 및 피치간격과 직렬저항과의 관계를 시뮬레이션한 결과이다. 피치간격이 줄어들수록 직렬저항이 감소하며 이러한 경향은 비저항이 큰 기판에서 더욱 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다²³⁾.

피치간격이 작아지면 pn-정선의 길이가 증가하여 정선분리 및 미세한 전극형성 등 공정상의 여러 문제점들이 나타나기 때문에 다른 여러 변수들을 함께 고려하여 결정하여야 한다.

3.4 Emitter

3.4.1 Emitter 형성

EWT 태양전지는 기판의 전면 및 후면뿐만 아니라 비아홀 내부에도 도핑된 emitter 층을 갖기 때문에 이를 동시에 구현할 수 있는 공정으로는 확산로(diffusion furnace)의 사용이 가장 일반적이다. 비아홀 내부의 도핑이 전면이나 후면 emitter에 비해 낮거나 혹은 별 차이가 없다는 주장이 있었으나 필자의 LAB에서 도핑된 emitter 층을 LV-SEM으로 분석한 바에 의하면 비아홀을 갖는 기판을 확산법으로 도핑하는 경우 Fig. 10과 같이 기판의 표면과 비아홀 내부의 도핑 차이는 없는 것으로 확인이 되었다²⁴⁾.

기존 태양전지는 단파장 흡수율을 증가시키기 위해 shallow

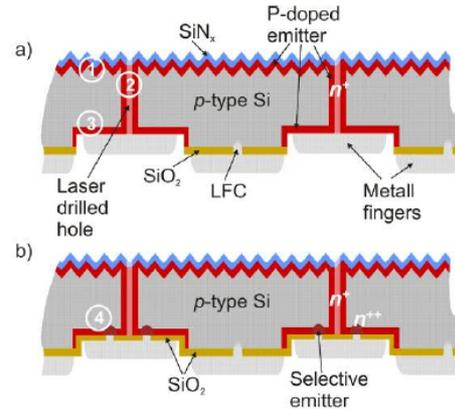


Fig. 11. RISE-EWT Selective emitter 태양전지

emitter를 구현하는 방향으로 기술개발이 진행되어왔다. EWT 태양전지는 전면 캐리어가 비아홀을 통해 수집되는 일종의 포인트 컨택(point contact) 구조를 가지게 되기 때문에 shallow emitter를 구현하게 되면 전면에 다량 생성된 캐리어가 비아홀 emitter의 높은 저항으로 인해 후면으로 이동하지 못하는 current-crowding 현상이 발생한다. 따라서 homogenous emitter를 가지는 EWT 태양전지들은 40~60Ω/sq. 사이의 면저항을 갖게 도핑하는데 이는 광흡수와 current-crowding의 적절한 타협이라고 할 수 있다.

3.4.2 Homogenous emitter vs. Selective emitter

기존 태양전지에서 적용되는 selective emitter 기술은 수광면에서 단파장 흡수를 높이기 위해 도핑농도가 낮은 shallow emitter를 형성하고 전극과 접촉하는 부분의 컨택 저항을 낮게 유지하기 위해 전극 하부에만 고농도 도핑 하는 이원화된 도핑 농도를 갖는 태양전지 기술을 의미한다.

ISFH에서는 RISE-EWT(Rear Interdigitated Single Evaporation Emitter Wrap-Through)에 selective emitter 개념을 도입하여 21% 이상의 고효율을 보고한 바 있다²⁵⁾. RISE-EWT는 Fig. 11에서 알 수 있듯이 후면의 emitter와 base 영역이 단차를 갖게 레이저 가공공정을 거치기 때문에 pn-정선이 조밀한 후면에서

Table 2. Emitter의 도핑농도 변화에 따른 셀 효율

| 셀 유형 | emitter 위치별 면저항($\Omega/\text{sq.}$) | | | | 효율(%) |
|------|--|----|----|----|-------|
| | ① | ② | ③ | ④ | |
| I | 40 | 40 | 40 | - | 20.0 |
| II | 100 | 40 | 40 | - | 20.6 |
| III | 40 | 40 | 40 | 20 | 21.4 |

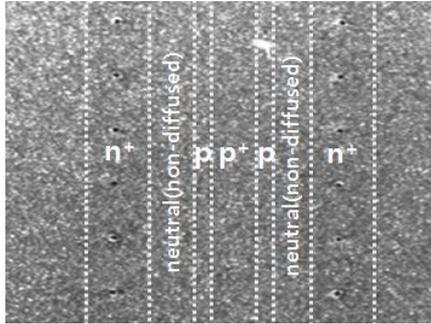


Fig. 12. EWT 태양전지의 후면정선 분포

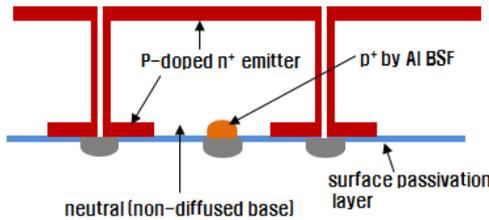


Fig. 13. 정선 및 전극 구성도

의 정선 분리에 유리하고 Al metal 증착 및 LFC(laser fired contact) 기술을 적용한 고효율 기술이다. 여기에 추가적으로 selective emitter 기술을 적용한 것이다.

실험결과 Table 2에 정리하였다. 기판의 크기가 92cm²의 소형 셀에서 얻은 결과지만 EWT에서도 emitter의 도핑농도 변화에 따른 selective emitter의 구현 및 결과가 예상대로 잘 작동하고 있음을 보여주고 있다.

EWT에서의 selective emitter 구현은 기존 셀에 비해 emitter 종류가 다양하고 위치도 기판의 전후면 및 비아홀 내부에 분포되어 있다. 따라서 selective emitter를 구현하는 방식도 세 군데 emitter 간의 다양한 조합이 가능하기 때문에 단순화된 공정개발이 가장 중요한 기술적 핵심이라고 할 수 있다.

3.5 Passivation

3.5.1 전면 passivation

EWT 태양전지의 전면 passivation은 표면재결합을 억제하는 기능과 광흡수를 극대화하는 반사방지막 (anti-reflection coating) 기능을 겸하게 된다. 따라서 일반적인 결정질 실리콘



Fig. 14. Screen printing으로 구현된 EWT 전극패턴

태양전지에서 사용되는 전면 passivation layer를 그대로 적용할 수 있다.

3.5.2 후면 passivation

P-type에서 IBC 전극 패턴을 가지는 후면정선 EWT 태양전지는 인(P) 도핑으로 emitter를 형성하고 emitter 사이에 인쇄된 Al 전극의 소성시 생성되는 BSF(back surface field)에 의해 p+ base를 형성하게 된다. 따라서 Al 전극의 두께가 얇은 Al 전극의 작은 p 영역을 형성하고 p 영역과 n 영역 사이에는 도핑층이 존재하지 않는 neutral 영역으로 남게 된다.

IBC 전극패턴을 가지는 후면정선 태양전지는 정선길이가 매우 길고 neutral 영역에는 field effect passivation에 의한 재결합 방지 기능이 없기 때문에 surface passivation에 의한 재결합 방지가 더욱 중요해진다.

Fig. 12와 같은 정선 배치에 따라 전극을 구성하는 경우 (Fig. 13 참조) 표면재결합을 감소시키고 전극간의 절연 기능이 우수한 passivation layer의 도입이 반드시 필요하다. 고려해야 할 사항으로는 passivation layer의 surface charge가 positive를 띠는 경우 neutral 영역에서의 표면 재결합이 증가하고 emitter와의 접촉영역에서 parasitic shunting이 발생하게 된다.

모든 후면정선/후면전극 태양전지가 가지는 가장 큰 기술적 문제는 표면재결합을 최소화하고 전극 그리드 및 정선을 전기적으로 절연시키는 방법을 개발하는 것이다. 후면 passivation layer는 재결합방지 기능뿐만 아니라 전극 그리드간의 shunt를 방지하는 절연기능 및 흡수된 빛을 재반사하는 back reflector 기능도 추가된다. 따라서 후면 passivation의 성능개선은 후면 정선/후면전극 태양전지에서 Jsc, Voc 뿐만 아니라 FF의 증가를 수반할 수 있는 매우 중요한 공정이라고 할 수 있다.

3.6 Metallization

3.6.1 전극 공정

EWT 태양전지의 전극공정으로 가장 많이 적용되는 것은 스크린프린팅(screen printing) 기술이다.(Fig. 14 참조) 기존 상업화라인에서도 적용이 가능하기 때문에 가장 쉽게 접근할 수 있지만 emitter와 base 전극으로 Ag paste와 Al paste를 사용하여 2

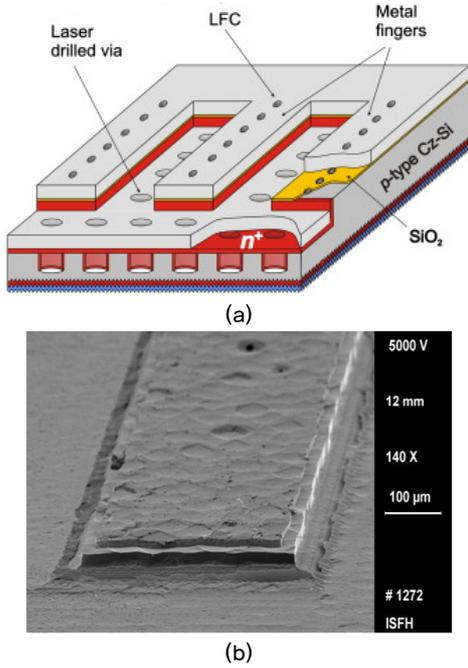


Fig. 15. RISE-EWT 태양전지: (a) 모식도 (b) 증착된 전극

회 인쇄하는 경우 1차와 2차 인쇄 조건이 상이하기 때문에 인쇄가 퍼지는 등 스크린 프린팅의 정밀도 및 재현성 문제가 있기 때문에 정선 간격을 줄이는데 한계가 있다. 피치간격이 2mm에서는 문제가 없으나 그 이하로 좁아지면 정교한 관리가 요구된다. 후면전극 태양전지의 새로운 전극형성 공정으로 새롭게 부각되는 기술이 AI 증착 기술이다. ISFH에서 RISE-EWT에 적용된 AI 증착 전극공정 기술은 단차에 의해 pn-정선을 분리하고 AI를 증착하면 단차의 측면에는 증착층이 약하기 때문에 쉽게 에칭으로 제거함으로써 분리된 전극을 형성하는 공정기술이다 (Fig. 15 참조)²⁶⁾.

최근 또 다른 기술인 epi 공정으로 후면전극 태양전지를 개발한 Solixel은 AI 증착에 의한 전극공정으로 20.1%를 보고하였다²⁷⁾. AI은 식품포장재의 코팅재로 광범위하게 사용되어왔기 때문에 상업적으로 적용하기에 큰 문제는 없다.

3.6.2 전극 패턴

후면전극의 전극 패턴은 효율을 결정하는 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 현재 유일하게 상업화된 Sunpower사의 IBC 태양전지는 5인치 기판을 사용하고 있으며 태양전지 양단에 두 개의 버스바 전극패턴을 가지고 있다. 주 전도체인 구리를 도금 공정으로 형성한다. 현재 상업화된 태양전지의 주력 기판인 6인치로 2-버스바 후면전극을 제작하는 경우 전류가 50% 이상 증가하고 핑거의 길이도 증가하므로 이를 감당하기 위해서는 5인치 기판에서 적용하였던 도금 층보다 훨씬 두터운 도금 층을 형성하여야 하기 때문에 공정상 쉽지 않은 문제이다.

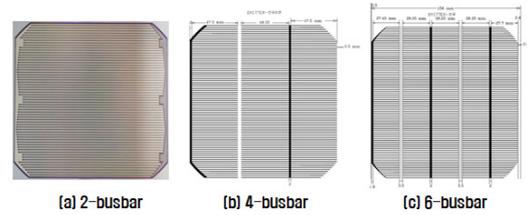


Fig. 16. 후면전극 버스바 패턴: (a) 2-버스바, (b) 4-버스바, (c) 6-버스바

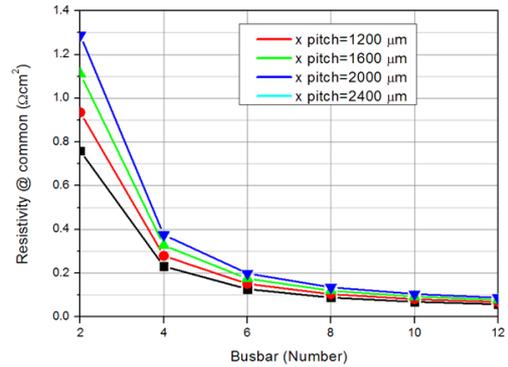


Fig. 17. 후면전극 버스바 증가에 따른 직렬저항 변화

기존 태양전지에서 사용되는 Ag와 Al paste를 전극재료로 사용하여 6인치 기판에서 2-버스바 EWT 후면전극을 제작하는 경우 높은 직렬저항으로 인해 기대만큼 높은 효율이 나오지 않는다. 기판의 크기와 전극재료가 정해진 상태에서 전극의 저항 손실을 줄일 수 있는 방법으로는 캐리어의 이동경로를 단축하는 것이다. Fig. 16과 같이 핑거의 길이를 단축하는 멀티 버스바 전극 패턴을 채택하는 것이다.

필자의 연구팀에서 버스바 증가에 따른 직렬저항의 변화에 대한 시뮬레이션 결과 직렬저항을 크게 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.(Fig. 17 참조) 그러나 버스바 영역에서는 캐리어의 횡방향 이동거리가 증가하기 때문에 electrical resistance가 증가하는 효과도 있기 때문에 효율 및 모듈제작 등의 관점에서 적절한 수의 버스바 패턴을 선정하여야 한다.

Eickelbroom 등은 전류추출 연결 접점을 태양전지 내부에 다수 형성함으로써 캐리어의 이동경로를 단축하여 직렬저항을 최소화하고 넓은 면적의 금속 포일과 전도성 접착제로 연결하는 MMA 방식을 제안하였다.(28) 구리가 코팅된 전도성 백시트를 사용한 MMA 방식에 의한 모듈화를 통해 태양전지의 직렬저항을 모듈의 금속 백시트를 통해 분산이 가능하기 때문에 핑거 길이 및 전극재료에 의한 제한을 완화시켜 저가의 스크린 프린팅 공정으로도 고효율 모듈 제작이 가능한 장점이 있다. MWT 및 EWT 태양전지의 전극 및 모듈화에 가장 적합한 기술이라고 할 수 있다.

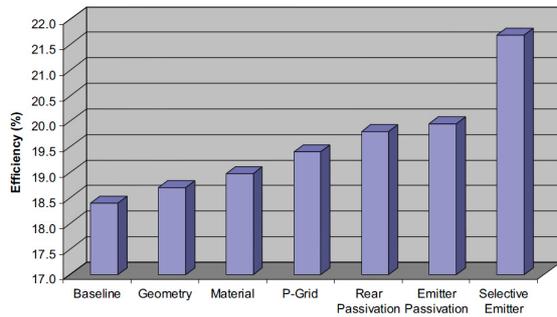


Fig. 18. EWT 태양전지의 고효율 달성을 위한 로드맵

4. EWT 태양전지의 고효율 전략

상업화 공정라인을 적용한 파일럿(pilot) 라인에서 EWT 태양전지는 $40\text{mA}/\text{cm}^2$ 이상의 전류밀도를 쉽게 얻을 수 있으나 낮은 Voc와 FF로 인해 기대만큼의 고효율은 달성하지 못하고 있다. James M Gee 등은 셀의 분석과 모델링을 통하여 21% 이상의 고효율 로드맵을 제시하였다(Fig. 18 참조)²⁹⁾. Voc를 높이기 위하여 25% 정도의 bulk 재결합을 줄이기 위한 기판의 중요성 및 나머지 75%의 재결합에 영향을 미치는 전후면 passivation이 중요함을 보여주고 있고 FF에 영향을 미치는 직렬저항을 줄이기 위해 피치간격 및 전극패턴을 통해 효율 증대에 기여할 수 있음을 보여주고 있다.

기존 태양전지와 다르게 selective emitter의 중요성이 매우 큰 것으로 나타나고 있는데 이는 기판의 양면에 emitter를 가지는 EWT 태양전지의 emitter coverage 크기 때문에 나타나는 특징으로 이해된다.

기존 태양전지의 고효율을 향한 최근의 기술동향은 selective emitter, 후면 passivation 및 포인트 컨택의 도입이며 이러한 경향은 EWT와 유사한 MWT 태양전지에도 적용되어 6 인치 Cz 기판에서 평균효율 20.6%가 지난해 보고되었다⁵⁾.

따라서 앞서 거론된 고효율 기술들이 EWT 태양전지에 적용된다면 향후 상업화 라인에서 20% 이상의 평균 생산효율을 달성 가능성이 가능할 것으로 전망되고 있다.

후 기

본 연구는 에너지기술평가원(신재생 에너지 기술개발 사업-전략기술)의 개발비 지원으로 수행 되었습니다. (과제번호 : 2010301001003A)

References

1. J. M. Gee, et al, Simplified Module Assembly Using Back-Contact Crystalline -Silicon, 26th IEEE Photovoltaic specialists Conference, September 29 ~ October 3, 1997, Anaheim, California.
2. International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) Results 2011; F. Granek, "High Efficiency Back-Contact Back-Junction Silicon Solar Cells". Thesis, 2009; EV Kerschaver, G. Beaucarne, Back-contact solar cells: a review. Progress in Photovoltaics: Research and Applications 2006; 14: 107-123.
3. D.A. Clugston and P.A. Basore, PC1D version 5: 32-bit solar cell modeling on personal computers, in Proceedings of the 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, California, USA, 207-10 (1997).
4. J. H. Bultman et al., Proceedings WCPEC-3, Osaka, 2003; P. C. de Jong et al., Proceedings 19th EPVSEC, Paris, June 2004, 2145; A. W. Weeber et al., Proceedings IEEE, Hawaii, May 2006.
5. 3rd MWT workshop, Amsterdam, Nov. 2012.
6. J. M. Gee, W. K. Schubert, Paul A. Basore, Emitter Wrap-Through Solar Cell, IEEE, pp. 265~270, 1993.
7. B. Raabe, et al 2005, "Monocrystalline silicon-future cell concepts", 20th EUPVSEC, Barcelona, Spain.
8. A. Fallisch, J. M. Gee and D. Biro, Photovoltaics International, Nov., 2011, p55; Gee, J.M., Schubert, W.K. and Basore, P.A. 1993, Proc. 23rd IEEE PVSC, Louisville, Kentucky, USA, p. 265.
9. E. V. Kerschaver, C. Zechner, J. Dicker, Double Sided Minority Carrier Collection in Silicon Solar Cells, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 47, NO. 4, pp. 711~717, 2000.
10. J. Dicker, J. Solter, J. O. Schumacher, S.W. Glunz, W. Warta, Analysis of Rear Contacted Solar Cell Structures for Cost-Effective Processes and Materials, IEEE, pp. 387~390, 2000.
11. J. Dicker, Ph.D. thesis, University of Konstanz, 2003.
12. P. Hacke, J. M. Gee, M. Hilali, J. Dominguez, H. Dundas, A. Jain, G. Lopez, B. Fischer, and B. L. Sopori, Proceedings of the 21st European PV Solar Energy Conference, Dresden, Germany WIP, Munich, Germany, 2006, p. 761.
13. D. D. Smith and J. M. Gee, Proceedings of the 16th European PV Solar Energy Conference, Glasgow, United Kingdom James & James, London, UK, 2000, p. 1104.
14. A. Schönecker, H. H. C. de Moor, A. R. Burgers, A. W. Weeber, J. Hoornstra, W. C. Sinke, P.-P. Michiels, and R. A. Steeman, Proceedings of the 14th European Photovoltaic Solar Conference, Barcelona WIP, Munich, 1997, p. 796.
15. C. Ulzhöfer, P. P. Altermatt, N. P. Harder, R. Brendel, Loss analysis of emitter-wrap-through silicon solar cells by means of experiment and three-dimensional device modeling, Journal of Applied Physics, Vol. 107, pp. 104509, 2010.
16. R. R. Schmit, Emitter wrap-through back contact solar cells on thin silicon wafers, USP 7649141.
17. F. Colville, THE HOLE STORY: Lasers Take the Wrap, INTER PV, 2009; 이흥구 외, EWT 태양전지 제작을 위한 레이저 미세 관통홀 가공 기술 Laser via drilling technology for the EWT solar cell 한국태양에너지학회 논문집 제31권 제4호, 2011.8, p103-111; A. Schoonerbeek et al, Laser technology for

- cost reduction in silicon solar cell production, Proc. Of 69th Laser Materials Processing Conference, ISBN 4-947684-70-4, 2007.
18. A. Polyakov, T. Grob, et al, Comparison of Via- Fabrication Techniques for Through-Wafer Electrical Interconnect Applications, 2004 Electronic Components and Technology Conference.
 19. R. Kling, The interaction of laser light with crystalline Silicon, OptecNet workshop photovoltaics, 2007
 20. D. Wolff et al, High power diode lasers and current applications –Enabling features for DPSSL and laser micro processing, LTJ, May 2009 No.3
 21. Knorz, et al, High speed laser drilling: Parameter evaluation and characterization, 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10, September 2010.
 22. N. Mingirulli, et al. Passivation of laser-drilled via holes for emitter-wrap-through-cells. In Proceedings of the 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Spain, 2008; 996-999.
 23. H. Haverkamp, S. Scholz, G. Hahn, Screen Printed EWT Cells: Limitations and Alternative Approaches to the Manufacturing process, 23rd EC PVSEC, pp. 1~5, 2008.
 24. J. Cho et al, Efficiency Enhanced Emitter Wrap-Through (EWT) Screen-Printed Solar Cells with Non-uniform Thickness of Silicon Nitride passivation Layer in Via-holes, Solar Energy, 2013, 90, p 188.
 25. N. P. Harder, S. Hermann, A. Merkle, T. Neubert, T. Brendemühl, P. Engelhart, R. Meyer, R. Brendel, Laser-processed high-efficiency silicon RISE-EWT solar cells and characterisation, Physics Status Solidi, Vol. 6, No. 3, pp. 736~743, 2009.
 26. N. P. Harder, P. Engelhart, A. Merkle, R. Grischke, A. Teppe, R. Meyer, R. Brendel, RISE-EWT: Simple and Robust High-Efficiency Silicon Solar Cells, 17th Workshop on Quantum Solar Energy Conversion, pp. 1~4, 2006.
 27. M. A. Green, et al, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol 21, pp. 1-11, 2013.
 28. Eikelboom, D. W. K., et al. 2001, Proc. 17th EU PVSEC, Munich, Germany, p. 1547.
 29. J. M. Gee, P. Kumar, J. Howarth, T. Schroeder, J. Franklin, J. Dominguez and D. Tanner, Development of industrial high-efficiency back-contact czochralski-silicon solar cells, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2011.