

태양전지 기술개발 현황

이 은 주

(주)신성홀딩스 기술연구소(ejlee@shinsung.co.kr)

태양전지 시장동향

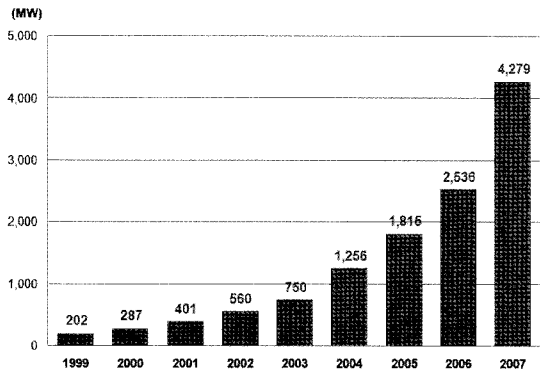
미국 전 부통령 앨고어가 제작한 다큐멘터리 영화 ('불편한 진실: An Inconvenient Truth')에서 보면 북극곰이 빙하 조각을 찾아 헤메다가 결국 바다속으로 사라지는 안타까운 장면을 볼 수 있다. 또한, 전 세계적으로 변하고 있는 기후 때문에 생태계가 파괴되고 이상현상이 일어나는 등 우리가 화석 연료를 사용하여 얻는 편리함에 비교하여 가속화된 환경 파괴의 심각성을 보여주기도 한다. 이러한 상황에 대한 전 세계적인 각성의 수위가 높아지면서 온실가스 배출 감축에 대한 교토의정서가 발효되기도 하였으며, 에너지 고갈에 대한 위기감과 환경 친화적인 에너지에 대한 필요성으로 그린에너지의 중요성이 강조되고 있다.

그린에너지, 즉 신재생에너지는 태양, 풍력, 바이오 에너지등 열두가지 분야의 청정 에너지를 말한다. 현재, 신재생에너지는 세계적으로 특히 환경에 대한 위기감과 세계적인 공감대 및 정부차원의 지원에 힘입어 급격히 성장하고 있다.

이러한 신재생에너지 중 태양에너지의 성장은 매우 빠른 속도로 진행될 것으로 예상되고 있다. 실제로 발전용 태양전지 시장은 매년 30% 이상의 시장 성장을 나타내었다. 그림 1에 연도별 전 세계 태양전지 시장의 동향을 나타내었다. 2007년 시장은 2006년 대비 69%의 경이적인 시장 성장률을 기록하

였다. 전 세계의 실리콘 부족을 예측하여 비관적인 의견이 지배적인 상황에서 기대 이상의 성장률을 나타내며 4.2 GW(Giga Watt)에 가까이 도달하였다. 최근 발전용 태양전지의 시장이 급격히 성장하면서 결정질(crystalline) 실리콘 태양전지의 중요성이 부각되고 있다.

그림 2에 태양전지 종류별 시장 점유율을 나타내었다. 실리콘 태양전지는 기관에 따라 단결정 실리콘, 다결정 실리콘, 리본 실리콘, 그리고 비정질 실리콘 태양전지로 나눌 수 있다. 그중 단결정 실리콘과 다결정 실리콘을 포함하는 결정질 실리콘 태양전지는 2007년 전체의 87.6%를 차지하고, 다른 비정질 실리콘, CIS, CdTe 등을 모두 합쳐야 약 10%가 된다. 그 이유는 대량생산, 신뢰성, 수명, 효율과 원료



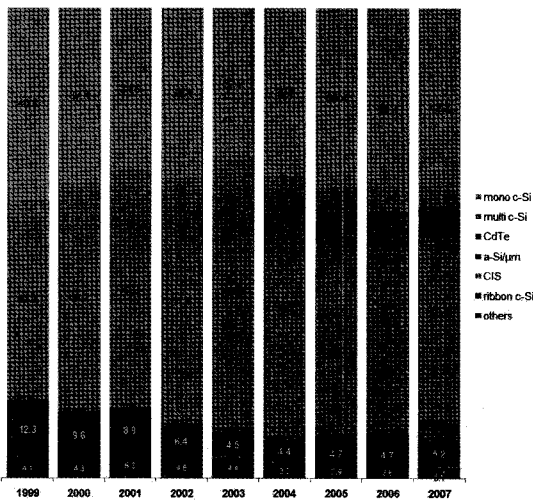
[그림 1] 태양전지 시장동향 (Photon international)

수급 면에서 우수한 결정질 실리콘 태양전지가 태양 전지의 시장 증가의 주요 원인인 주택 및 소규모 발전소용으로 적합하기 때문이다. 또한 이전의 반도체 산업을 통하여 형성한 원료생산, 관련 설비, 인적 자원 등과 같은 반도체 인프라를 이용하여 쉽게 대량 생산체제를 갖추므로써 급격히 증가하는 시장 수요에 잘 대처할 수 있다는 장점이 있다. 전문가들도 최소한 향후 10년간은 결정질 실리콘 태양전지가 시장을 주도할 것으로 예상하고 있다.

태양전지 기술동향

태양전지 동작원리

태양광 발전의 핵심은 태양전지(Solar Cell 또는 Photovoltaic Cell)로서, 태양광을 직접 전기로 변환시키는 반도체 소자이다. 그림 3과 같이 반도체의 pn접합으로 만든 태양전지에 반도체의 금지대폭(Eg : Band-gap Energy)보다 큰 에너지를 가진 태양광이 입사되면 전자-정공 쌍이 생성되는데, 이들 전자-정공이 pn 접합부에 형성된 전기장에 의해 전자는 n층으로, 정공은 p층으로 모이게 됨에 따라 pn간에 기전력이 발생한다. 이 때 양단의 전극에 부하를 연결하면 전류가 흐르게 된다.

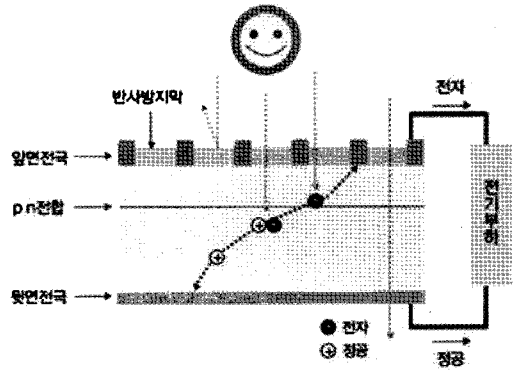


[그림 2] 태양전지 종류별 시장 점유율

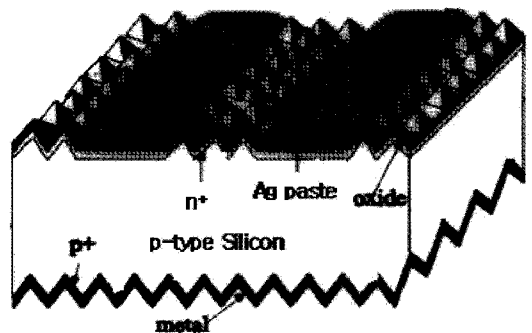
이러한 태양전지는 필요에 따라 직·병렬로 연결하여 장기간 자연환경 및 외부 충격에 견딜 수 있는 구조로 만들어 사용하게 되는데, 그 최소 단위를 태양광 모듈(Module)이라 한다. 그리고 실제 사용부하에 맞추어 모듈을 어레이(Photovoltaic Array) 형태로 구성하여 설치하게 된다.

상업용 결정질 실리콘 태양전지

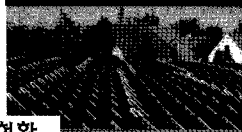
현재 상업용으로 가장 많이 적용되고 있는 태양전지는 스크린프린팅 방법으로 제작되고 있다. 스크린프린팅 방법은 매우간단하면서도 안정적이고 쉽게 공정에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 변환효율은 약 14 ~ 16% 수준이다. 그림 4에 스크린프린팅 태양전지의 구조를 나타내었다. 현재 유럽 및 일본 등 태양전지 관련 업계와 연구소에서는 스크린프린팅 태양전지의 효율 향상을 위해 페이스트나 프



[그림 3] 태양전지 동작원리



[그림 4] 스크린 프린팅 태양전지



린터 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 스크린프린팅 태양전지의 구조에서 전지의 전면 전극은 은 페이스트로 스크린 프린팅 되어 있고, 후면 전극은 알루미늄 페이스트를 이용하여 제작되었다. 이와 같은 스크린 프린팅의 일반적인 제조 공정을 간단히 설명하면 다음과 같다.

- Saw Damage Etching

p-type 다결정 실리콘 웨이퍼(As-cut)의 표면의 손상(saw damage)를 제거하기 위해서, 알칼리 용액이나 산 용액에서 표면을 식각한다.

- Phosphorous Diffusion

pn junction을 형성하기 위해 확산 furnace에서 인 확산 공정을 거쳐 에미터를 형성한다.

- PSG(Phospho-Silicate Glass) 제거

확산공정 후에 다음 공정인 반사방지막 공정과 금속전극 형성을 위해 기판 표면에 생성된 PSG를 주로 불산 용액을 이용하여 etching한다.

- Anti-reflection coating

기판 표면의 반사율을 낮추기 위해 반사방지막을 증착한다. 반사방지막으로는 PECVD를 적용하여 SiN_x 막을 형성한다.

- Screenprinting

전후면 전극을 스크린 프린팅으로 형성을 하게 된다. 전면전극은 은이 일반적이다. 이에 사용되는 페이스트는 점성의 성질을 지니고 있어 100 ~ 200°C에서 건조 공정을 거치며, 전지의 후면전극을 형성하기 위하여 스크린 프린팅으로 은과 알루미늄으로서 전극을 형성 후 건조공정을 거친다. 건조 후에 belt furnace를 이용하여 전극이 기판에 접촉할 수 있도록 고온 열처리를 한다.

- Edge Isolation

인의 확산공정 후에 기판의 모서리에도 저항이 낮은 에미터가 잔존하게 되고 이러한 에미터는 전면 전극과 후면전극 사이에서 shunt를 일으키게 되어 태양전지의 효율을 떨어뜨리게 되는 요인이 된다. 이를 제거하기 위해 레이저 또는 chemical이나 plasma 등을 이용하여 edge 부분을 isolation 한다.

- Cell Testing & Sorting

이상과 같이 태양전지 제작이 완료된 후에 각 태양전지의 성능을 평가하고, 성능에 따라 분류하여 판매한다.

태양전지 기술개발 현황

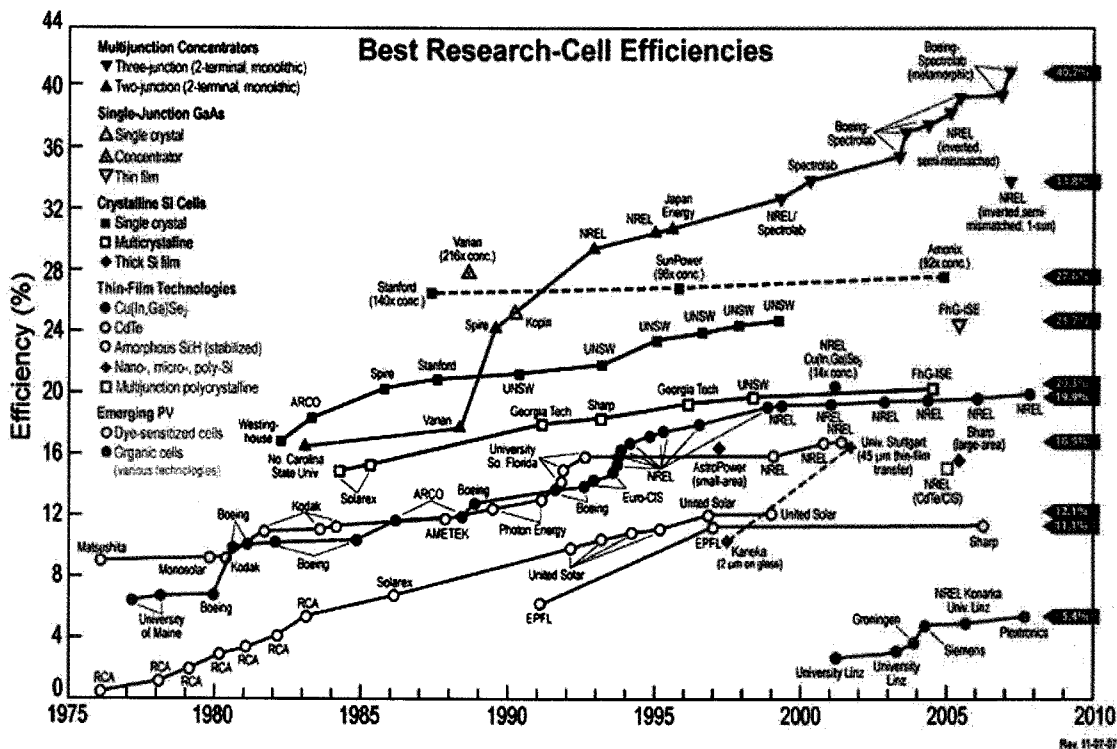
최근까지 태양전지 기술 개발 방향은 발전 단가를 낮추는 저가형 태양전지 개발 연구와 변환 효율을 높이는 고효율 태양전지에 대한 연구 개발이 진행되고 있다. 태양전지의 발전단가를 낮추기 위하여 저가로 대량 생산이 가능하도록 다양한 물질과 공정이 개발되었지만, 변환 효율이 낮아 상용화에 큰 걸림돌이 되고 있다. 또한 변환 효율 향상을 위해 과거에는 변환 효율이 높은 물질을 찾기 위해 다양한 시도가 이루어졌으며, 현재는 물질 합성과 적층 구조 등을 이용하여 광흡수 대역을 넓혀 변환 효율을 높이는 데 주력하고 있다. 그림 5에 최근 태양전지 기술 개발 현황을 나타내었다.

태양전지 연구개발은 미국, 유럽, 일본 및 호주에서 활발하게 진행되고 있으며, 공통적으로 국가적 차원에서 주도되고 있다. 미국은 주로 NREL, SNL 등과 같은 국립연구소를 중심으로 기초에서부터 제품까지 다양하게 연구를 진행하고 있으며 Solarex, Astropower, Terrasolar, Sunpower, Spectrolab 등 기업에서 다양한 태양전지 제품을 생산·판매하고 있다. 유럽의 경우 독일의 프라운호퍼 태양전지 시스템 연구소, Siemens, 네덜란드의 ECN, Shell Solar, 영국의 BP Solar, 스위스의 EPFL 등 대부분의 국가가 정부 주도 하에 산·학·연으로 기초·응용·제품 연구를 수행하고 있다. 일본은 국립연구소 및 대학뿐만 아니라 Kyocera, Sanyo, Sharp, Toshiba 등 대기업들이 기술 개발을 진행하고 있다.

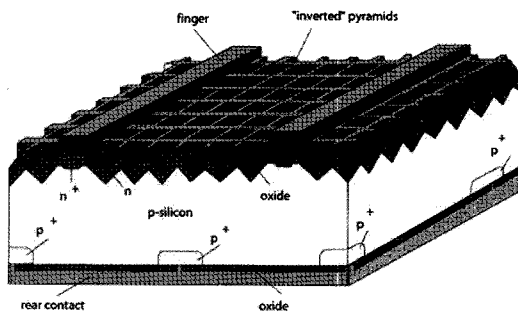
• 고효율 실리콘 태양전지

실리콘계 태양전지의 고효율화를 위한 노력은 연구실에서 뿐만 아니라 상업용 태양전지에서도 다양한 구조와 공정개발을 통하여 연구개발이 진행 중이다. 그림 6은 현재까지 개발되어온 고효율 실리콘 태양전지의 구조를 간략하게 나타내었으며, 그림 6 a)는 결정질 실리콘 태양전지의 최고 변환효율(24.7%)을 기록한 PERL solar cell 이다.

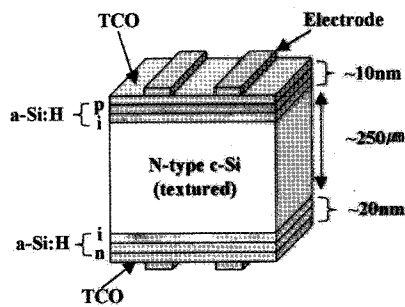
그림 6 b)는 아몰퍼스 실리콘과 단결정 실리콘의 장점을 동시에 이용한 HIT(Hetero-junction with intrinsic thin layer) 구조의 태양전지이다. 기존의 태양전지가 고온에서 확산공정에 의해 에미터를 형성시킨 것과는 달리 HIT 구조에서는 p-type과 intrinsic



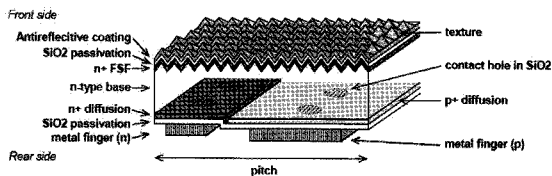
[그림 5] 태양전지 기술개발 현황(출처:National Renewable Energy Laboratory (USA))



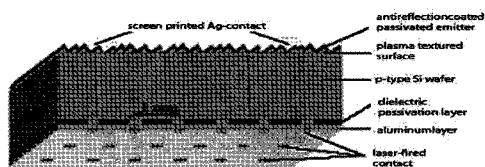
a) PERL(Passivated emitter rear locally diffused) solar cell



b) HIT(Hetero-junction with intrinsic thin layer)

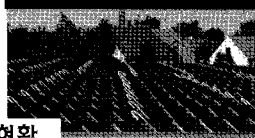


c) Back contact cell



d) LFC(Laser Fired Contact)

[그림 6] 고효율 태양전지 구조



아몰퍼스를 이용하여 결정질 실리콘에 형성시킨 것이 특징이다. 아몰퍼스 박막의 형성은 보통 400℃ 이하에서 가능하기 때문에 전 공정이 저온에서 이루어진다는 것도 큰 장점이다. 그러나 전면의 아몰퍼스가 전도도가 낮아서 보조전극으로 투명전도막을 사용해야 하는데 투명전도막에서의 반사나 흡수는 변환효율을 줄이는 단점이 있다. Intrinsic 층을 사용한 경우 변환효율이 21.3%로 보고되었다. Sunpower에서 개발한 후면전극(Point contact) 태양전지는 **그림 6 c)**와 같이 shading loss로 작용하는 전면전극이 존재하지 않고 음극과 양극의 전극을 모두 뒷면에 형성시킨 구조가 특징이다. 전극이 한쪽에만 존재하기 때문에 기판의 품질이 좋아야하고 전면과 후면의 표면 passivation이 아주 중요하다. 지금까지 가격이 높아서 집광형 태양전지나 일부 고효율이 요구되는 특수한 용도에 사용되었으나 최근 후면전극을 값비싼 사진식각공정 대신 스크린프린팅 공정을 이용하여 형성함으로써 지상용을 대량생산 할 수 있는 발판을 마련하였다. 최근 FZ과 CZ 기판을 이용하여 각각 20.4%, 19.5%의 효율을 보고하였다. **그림 6 d)**에 독일의 Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems에서 개발한 LFC(Laser Fired Contact) 태양전지는 laser를 이용하여 후면 point contact을 PERC 구조의 태양전지와 같은 구조로 형성하는 방법을 적용하였다. 후면에 전극을 국부적으로 형성시키고 접촉계면에 알루미늄을 도핑하기 위해서 알루미늄을 증착하고 레이저 빔을 이용하여 어닐링하는 것이 특징이다. 국부적으로 전극을 형성하기 위해서 사진식각을 사용하는 공정에 비해서 훨씬 저렴한 가격으로 생산할 수 있다는 장점이 있다. 후면전극 구조가 기존의 알루미늄 BSF 보다 우수하여 21.3%의 높은 효율을 기록했다.

• 박막 태양전지

박막 태양전지 중 가장 처음으로 개발된 것이 비정질 실리콘으로 기존 결정질 실리콘 태양전지의 약 1/100에 해당하는 두께만으로도 태양전지의 제조가 가능하다. 또한 값싼 기판을 사용하여 일괄 공정으로 대면적 모듈의 대량 생산이 가능하고 생산에 소요되는 에너지가 적은 것이 장점이다. 하지만 결정질 실리콘 태양전지에 비해 효율이 낮고, 특히 초기

빛에 노출될 경우 효율이 급격히 떨어지는 단점이 있다. 따라서 대규모 발전용으로는 사용되지 못하고, 시계, 라디오, 완류 등 소규모 가전제품의 전원용으로 주요 사용되고 있다. 최근 효율의 향상과 함께 초기 열화 현상을 최소화할 수 있는 다중 접합 구조의 비정질 실리콘 태양전지의 개발과 함께 일부 전력용으로 이용되기 시작하였다.

뒤이어 출현한 박막 태양전지가 CdTe, CuInSe₂ (CIS)계의 화합물 반도체를 소재로 한 것이다. 비정질 실리콘에 비해 효율이 높고, 또한 초기 열화 현상이 없는 등 비교적 안정성이 높은 태양전지로 현재 CdTe는 대규모 전력용으로 사용을 위한 실증 시험 중에 있다. CuInSe₂는 실험실적으로 만든 박막 태양전지 중에 가장 높은 19.9%의 변환효율을 기록하고 있다. GaAs, InP 등 단결정으로부터 만든 화합물 태양전지는 결정질 실리콘 태양전지보다 높은 효율을 나타낸다. 2006년 Spectralab에서 GaInP/GaInAs/Ge 3중 접합 태양전지 구조를 이용하여 AM 1.5에서 ×240배 집광하여 변환 효율 40.7%를 얻었다. 또한 4중 접합 이상의 접합 태양전지는 이론적으로 최대 59% 효율을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. III-V 화합물 반도체 태양전지는 제조 단가가 실리콘 태양전지에 비해 매우 높아 인공 위성과 같은 특수 용도로 주로 사용되었지만, 최근 효율이 실리콘 태양전지의 2배가 되면서 지상용 전원으로 사용하려는 연구가 미국, 일본, 호주에서 주도적으로 진행중이다.

1990년대 초반부터는 반도체 무기 소재 대신 유기 염료를 소재로 광합성 원리를 이용한 염료감응 태양전지, donor와 acceptor 특성을 갖는 유기 분자형 태양전지와 같은 유기 태양전지 연구가 진행되고 있다. 유기 분자형 태양전지는 에너지 변환효율이 2007년에 5.4%로 매우 낮지만, 매우 얇고 가벼운 플라스틱 태양전지의 실현 가능성을 볼 수 있다.

• 3세대 태양전지(나노 태양전지)

1, 2세대 태양전지의 광전 변환 방법은 흡수되는 광자의 에너지에는 무관하고 오직 흡수된 광자의 수에 비례하여 전자-양공쌍을 생성함으로써 높은 에너지를 가지는 광자의 남는 에너지는 열로 손실되므로 매우 비효율적이다. 그러나, 3세대 태양전지는 높은 에너지 광자를 흡수하여 여기 상태에 생성된 전자와

양공이 낮은 에너지 상태로 천이하면서 1개의 전자-정공쌍을 생성하고, 천이 때 생성되는 빛에너지를 재흡수하여 2개 이상의 전자-양공쌍을 생성하는 메커니즘을 이용하고 있으며 이러한 태양전지는 태양의 빛에너지를 보다 효율적으로 전기에너지로 전환이 가능함으로써 획기적으로 효율을 증가시킬 수 있다. 현재 양자점과 나노 입자 등을 이용한 태양전지 연구가 진행되고 있으며, 이론적 가능성을 보여주고 있다.

결론

전세계 태양전지 시장을 주도하고 있는 결정질 실리콘 태양전지의 기술개발은 보다 저렴한 재료를 이용하고 공정비용을 줄여 태양전지의 가격을 낮추면서 우수한 성능을 얻을 수 있는 방향으로 진행되고 있다. 박막 형태의 실리콘 태양전지 개발이나 박막 화합물 반도체 태양전지, 유기물을 이용한 태양전지 개발 등이 모두 태양전지의 가격을 줄이기 위한 노력의 일환이라고 할 수 있다. 향후 10년 이상 전체 태양전지 시장을 이끌어나갈 결정질 실리콘 태양전지 역시 제작비용을 낮추면서 성능을 향상시켜 단위 생산 전력당 가격을 낮추는 방향으로 기술 개발이 지속적으로 진행될 것이다.

이에 따라 전체 태양전지 시장의 대부분을 차지하는 상업용 결정질 실리콘 태양전지에 대한 고효율, 저가격화 기술 개발이 활발히 진행될 뿐만 아니라, 그 동안 높은 제작 단가로 인하여 인공위성과 같은 특수 용도로만 사용되던 III-V 화합물 반도체 태양전지가 고집광 장치와 결합하여 발전 단가를 실리콘 태양전지 수준으로 낮출 수 있는 기술이 개발됨으로써 지상용 에너지원으로 부각되고 있다. 현재 집광형 III-V 화합물 반도체 태양전지의 최고 효율은 40.7%를 달성하였고, 매년 1%씩 효율 증가를 예상하고 있으며, 2009년에는 45% 효율을 달성할 것으로 예상되며 가까운 시일 내에 집광형 III-V 화합물 반도체 태양전지가 미래 에너지원으로 자리를 잡을 것으로 예상된다. 또한 양자점이나 나노입자 등을 이용하여 기존 태양전지의 광전 변환 메커니즘을 대폭 개선한 3세대 태양전지는 실내 조명등만으로도 저전력 디지털 기기의 전원으로 사용이 가능할 것으로 예상된다.

이상과 같이 태양광 발전 관련 시장 규모도 급성장하게 됨에 따라, 여러 다양한 종류의 태양전지가 1세대를 지나 2세대, 3세대로의 기술적 진보를 거듭하고 있으며, 향후 낮은 제조원가를 갖는 고효율 상업용 태양전지 기술 개발의 성패가 시장 지배력을 좌우할 것으로 보인다. ●